MR ダンパーによる
セミアクティブ免震制御に関する研究

SEMI-ACTIVE SEISMIC RESPONSE CONTROL OF
BASE-ISOLATED BUILDING
WITH MAGNETO-RHEOLOGICAL DAMPER

早稲田大学　理工学研究科

建築学専攻　建築構造研究

沈里通

目 次

第 1 章　序論

1.1　研究の背景　・・・

4.2.5 最適パラメータの策定例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50
4.3 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52

第 5 章 小型 3 層免震フレームの振動台実験

5.1 振動台実験システム
5.1.1 振動台 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・55
5.1.2 計測システム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・56
5.1.3 制御システム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
5.1.4 入力外乱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
5.2 実験結果および考察
5.2.1 各階最大応答に基づく考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
5.2.2 履歴に基づく考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・60
5.2.3 応答予測制御に関する考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63
5.2.4 応答変位と応答加速度のトレードオフ関係 ・・・・・・・・・・・・・・・64
5.3 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66

第 6 章 大型 3 層免震フレームのシミュレーション解析

6.1 大型 MR ダンパーおよび検証対象建物の概要
6.1.1 40kN 級 MR ダンパーと力学特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
6.1.2 大型の 3 層建物モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72
6.2 地震応答解析方法
6.2.1 解析モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・73
6.2.2 入力地震波 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
6.2.3 MATLAB/Simulink を用いるシミュレーション ・・・・・・・・・・・・・・74
6.3 制御パラメータ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76
6.4 解析結果と制御効果の検証
6.4.1 時刻歴応答およびダンパー履歴による考察 ・・・・・・・・・・・・・・・77
6.4.2 最大応答のレードオフ関係の検証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
6.5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95

第 7 章 結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・97

第１章

序論

1.1 研究の背景

1994 年のノースリッジ地震、1995 年の兵庫県南部地震[1-2]、1999 年の台湾集集地震では、建物、橋梁、鉄道、港湾などの土木構造が地盤の激しい揺れにより、構造的な被害や住民の死傷が多く発生した。日本では、東海、東南海、南海の大地震[3]が予想され、内閣府より首都直下地震の被害想定と地震防災に対する強化対策がなされている。いつ大地震が起きても不思議ではないと考えられる。阪神大震災及び耐震設計基準の見直しを契機に、建物の耐震性能を高めることが求められてきた。そのため、新築や増築、既存不適格建築物の補強などの構造設計において、優れた耐震技術及び制振装置が多く使用されている[4-5]。例えば、「新耐震設計法」[(6-7)]（1981）の改定後、地震入力を 2 段階（許容応力の計算と保有水平耐力の計算）で評価することが大きな特徴である。「限界耐力計算法」[(8-9)]（2000 年）は基準入力スペクトルを工学基盤位置で規定し、表層地盤の増幅特性を考慮することになっている。これらの構造計算方法により、より合理的耐震計算に進んでいる。

この 20 年以来、建物には次第にエネルギー吸収装置が多く採用されるようになって来ている。北村[10]ら（2003）は日本建築構造技術者協会（JSCA）が実施された応答制御構造の適用建物調査（建物 494 件）の結果をもとに、日本における応答制御構造を表 1.1 のように分類している。高さ 120m までの建物では、エネルギー吸収機構が 9 割を占め、高さ 120m を超えると、付加質量の制御機構を採用する建物が増加することである。

表 1.1　応答制御構造の分類

機構	型・タイプ	システム・装置
免震構造	積層ゴム支承	天然ゴム系積層ゴム、 高減衰積層ゴム 鉛プラグ入り積層ゴム
	滑り・転がり支承	滑り支承、ローラ支承、転動コロ支承
エネルギー吸収機構	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー、鉛ダンパ、摩擦ダンパー
	粘性減衰	オイルダンパー、粘性ダンパー、粘弾性ダンパー
付加質量機構	パッシブ	TMD(Tuned Mass Damper) TLD(Tuned Liquid Damper)
	アクティブ	AMD(Active Mass Damper) HMD(Hybrid Mass Damper)
可変剛性	セミアクティブ	ASD(Adjustable Stiffness Damper)
可変減衰		AVD(Adjustabel Viscous Damper)

第１章　　序 論

建物の構造形式には、従来の耐震構造や制振構造、免震構造を 3 種類に分けている。大地震の際には、耐震構造は建物の柱、梁、壁などにより、建物への入力エネルギーを吸収する。建物の層間に、ダンパーなどのエネルギー吸収装置を取り付けることで、より地震動による揺れを抑える手法が制振構造と呼ばれる。減衰機構の付加方法には、エネルギーが吸収できるダンパーやパネルなどの制振装置を柱梁フレームに取り付けるものがある。免震構造 [11-13]は、入力エネルギーを免震層におけるアキュムレーターとダンパーに集中させることで、上部構造に入るエネルギーを大幅に低減できる手法である。

日本初の積層ゴムとするアキュムレーターによる免震建物は 1983 年に竣工した千葉県八千代にある住宅である [14]。阪神大震災以後、免震建物が多く採用されている [15]一方、2004 年 10 月の中越地震を経験した建物 [16-17]では、上部構造の応答加速度が大きく低減され、ダンパーなどによる減衰機構及び積層ゴムなどによるアキュムレーターを用いることは耐震性の向上に、有効な手段と認められている。2006 年まで日本の免震住宅の棟数は約 2,600 棟 [18]に至っており、病院、美術館、伝統木造建築などの既存建物の免震補強 [19-20]または中間免震 [21]も行われている。

また、免震機構の仕組みはアキュムレーターとしての積層ゴムまたは鉛を組み込ませた積層ゴムを建物の上部構造と基礎の間に挟み、建物の振動周期を長周期化する技術である。このような手法を用いることで、建物への地震入力エネルギーが吸収・遮断され、従来の耐震構造と比べて、より建物の応答変位と応答加速度を抑えることができる。地震がいつ起こるか、正しく予測できないのが現状であり、地震による人命や建物本体、収納物などの被害を事前に防ぐためには、免震装置及び減衰装置を適用する設計は非常に有効的な耐震技術である。

近年、オイルダンパーや粘弾性ダンパー、鋼材ダンパーなどを用い、低コスト、材料の安定性などの優位性を有することから、パッシブ系制振機構が数多く採用されている。また、ダンパー機構・仕組みを工夫し、より効率的に減衰性能を発揮できるダンパーは、「スマート」ダンパーと呼ばれ、それらの研究・開発もなされている。そのうち、コンピュータ・電気情報などの技術の発展とともに、インテリジェント化へのアクティブ制振(能動的制振もしくはActive Control)装置､及びセミアクティブ制振(準能動制振もしくはSemi-Active Control)装置についての研究や装置開発、適用事例が脚光を浴びている。

日本では、1989 年に地上 11 階建物(京橋センタービル)の屋上に短辺方向で 2 台のアクティブマスダンパー(Active Mass Damper)が設置された[22]が、これは建物への AMD 制御技術の適用では、世界初である。その後、中小地震や強風などによる居住性の向上のため、建物の固有周期を同調させるアクティブ同調マスダンパー(Active Tuned Mass Damper)と呼ばれる制振装置が多く採用されている。アクティブ制振装置はサーボアクチュエータを用い、大地震時に膨大な電力を消費するため、地震による停電など主な建物の制振装置とするのに問題がある。従って、1995 年の兵庫県南部地震以後、AMD による制振の適用が少なくなっている。

経済の発展および社会の要求につれて、高層ビルが多く建てられている一方、建物の耐震性能を保証するため、建物の「性能表示制度」[(23)]が導入されている。このような社会発展と居住性の要求のため、より高い耐震性、信頼性を有する建物が求められている。その一つとして、セミアクティブ制御技術の研究・開発・適用が進んでおり、減衰または剛性を可変とするセミアクティブダンパーの有効性が確認されている。1.2.2 節に示すように、1990-2006 年の間に、建物へのセミアクティブ制御による制振装置の適用(オイルダンパー)または試用(磁気粘性流体ダンパー)では、合計 19 棟(17 棟が制振、2 棟が免震)ある。これらの中には、電磁制御弁開閉により減衰係数が切り替えられる可変オイルダンパーのセミアクティブ制御や、磁気粘性流体への磁界作用により粘度を可変とする磁気粘性流体ダンパーを用いた制御がある。

単純な機構により容易に可変減衰を実現できる磁気粘性流体ダンパー(Magneto-Rheological Fluid Damper、以下は MR ダンパーと記す)を免震建物に適用するために各種のセミアクティブ制御則が提案されているが、地震波による制御効果の相違などの課題がまだ残っている。また、セミアクティブ制御則を実験的に検証するためには、数多くの振動台加振実験を行うことが必要であるが、大型モデルを使用する実験には制約が多い。そこで、本研究では、新たに小型 MR ダンパーを開発し、小型免震フレームと組み合わせて多数の振動台実験を行い、さらに、実大建物の試験体を解析モデルとする数値シミュレーションにより、新たに提案するセミアクティブ制御則の有効性の確認を目指すこととする。

1.2 既往の研究の概要

1.2.1 MR 流体および MR ダンパーの研究動向

1)MR 流体の力学特性

前述のとおり、セミアクティブ振動制御ではオイルダンパーを用い、制御弁の開閉により減衰係数を変える実例が多かった。これに対し、近年、外部環境や刺激などの外部条件に応じる機能性流体が各分野で多く適用されており、建物や橋梁など構造物への適用が試られている。その中では、電気粘性流体(Electro-Rheological Fluid、ER 流体)や磁気粘性流体(Mageneto-Rheological Fluid、MR 流体)などの外部の電気または磁界により力学特性を変化させる外部制御型流体が注目されている。1947 年に Winslow がコロイドの ER 流体の製造に関する特許を申請し、機械工学への応用法の提案をしたことで広く知られるようになった [24)]。MR 流体は 1940 年代に Rabinow より開発され [25)]、近年 Lord 社の Weiss[26)](1993)、Carlson[27-28)](1994)が新たな MR 流体を開発した。米国の Notre Dame 大学の Yang[29)](1996)、Spencer[30)](1997)が積極的に磁気粘性流体ダンパー(MR ダンパー)を利用したセミアクティブ振動制御の研究を行っている。

MR 流体と ER 流体の力学特性[31](森下、1999)上の比較を表 1.2 に示す。MR 流体の主な特性は以下の通りである。①降伏応力が高い：MR 流体の降伏応力は数 kPa に対して、ER 流体は数 kPa しかない。②必要な供給電力が小さい：MR 流体は必要な電圧は数 V で、ER 流体は数千 V の高電圧が必要である。③操作可能な温度の変化幅が広い：MR 流体に対応できる温度は冬の零下 50°C から暑い環境の 150°C までである。

表 1.2　MR 流体と ER 流体の力学特性の比較

特性	MR流体	ER流体
最大降伏応力(kPa)	50～100	2～5
密度(g/cm^3)	3～4	1～2
粘度(Pa-s)	0.2～1.0	0.2～1.0
供給電力	2～25V 1～2A (2～50Watts)	2000～5000 1～10mA (2～50Watts)
操作温度(°C)	-50～150	＋10～90

MR流体は磁界を加えることで、分散された微粒子がクラスタを形成し、流体にせん断変形が生じると、クラスタの形成に伴う抵抗が発生する流体である。また、MR流体には、磁場無しの場合がニュートン流体（力学特性はオイルダンパーと同じ）と呼ばれ、磁場ありの場合がビンガム流体と呼ばれる。現在MR流体を積極的に開発・生産しているメーカは、アメリカのLord社と日本のバンドー化学社しかなく、MR流体の基本特性に関する研究は既に多くの研究者により行われているが、磁性体粒子の沈殿の特性を抑えることが課題であった。

1998-2002年に、独立行政法人建築研究所が中心となって、日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発[32]」（以下、日米スマート)」が実施された。日米スマートプロジェクト研究で、表1.4に示すように、三種類のMRダンパー流体が使用された。Lord社のMRF-132LD流体(No.1)を使用し、バンドー化学社の荒木・外村ら[33-34] (2000-2002)は分散安定化効果の高い新規なMR流体を創製して、MR104流体(No.3)とMR230流体(No.2,No4-6)を開発した。開発されたMR流体は、沈降安定性やせん断応力、経時変化などの力学特性を検証し、市販品より、高い沈降の安定性(沈殿が少ない)が確認された。中谷、白石[35]ら(2002)は粘度計を用いて、磁場の強さを変化させた場合のせん断応力とせん断速度の関係を確認するため、無磁場下でのニュートン流体と磁場を加えたビンガム流体の挙動を検証した。また、MR流体を使用する時の注意点には、①分散粒子の沈殿が生じること。②磁気シールドが必要なこと。③磁界を発生させる電磁石からの放熱があること。などが指摘された。藤谷ら[36] (2000)は、真球状鉄粒子の沈殿実験によりMR流体の沈殿安定性について検証した。MR流体の温度依存に対する検証では、樋渡[37]ら(2006)が環境温度0~60°Cの範囲におけるMRダンパーの力学特性の確認実験を行い、常温20°Cに対する±15%程度の力学特性変化があることが確認された。(本研究において第2章で開発した小型MRダンパーはMR230流体を使用する。)

2)MR ダンパーの構造の種類

MR流体を通常のオイルダンパーと同様な構造を有するシリンダーに封入し、流体の流路に電磁石を設置して外部からの電流入力に応じて通過する流体の特性を変える仕組みとしてある。ダンパーの種類では片ロッド式と両ロッド式の2 種の機構が使用されている。

Load社が開発したMRダンパーは片ロッド式であり、ピストンに設けられたオリフィス部に電磁石が設置されているため、印加する電流の大きさに応じてそこを通過する見かけの粘度を任意に変化させる事が出来る。この機構では、ピストンロッドの動きにつれてシリンダー内部の容積が変化するので、それに対応するためにアキュムレーターを設置してある。MRダンパーの力学特性を検証するため、北川、曽田ら[38-39](2000)は片ロッド式の構造を有する市販品の自動車振動制御用のMRダンパー（米国LORD 社製Motion Master: RD-1005-3）を用い種々の加力実験により、その基本特性を明らかにしている。同研究では①電流を印加しない場合には通常の線形オイルダンパーと同様に楕円状の履歴を有すること、②印加電流の変化に対してＭＲダンパーは十分な範囲でその抵抗力を変える事、③印加電流の影響は流体の粘度の変化よりも滑り荷重の増減として顕著に現れること、④ダンパーの荷重変形関係は粘性要素と摩擦要素の並列結合として容易に近似できる事などが、実用化に向けて好ましい特性として認めている。その一方で、①電流値の変化に対するダンパー抵抗力の変化の遅れが0.03 秒前後生じること、②電流を印加することのみによってもダンパーの温度上昇が大きいこと、③さらに繰り返し変位を与えることにより温度が上昇してダンパーの力学特性が劣化することなど、不都合な点もあることを指摘している。

表 1.3　日米スマートで開発された MR 流体と MR ダンパー

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
最大荷重		2kN	20kN	200kN	40kN	40kN	400kN
最大速度		25cm/s	25cm/s	40cm/s	100cm/s	40cm/s	100cm/s
ストローク		±15mm	±25mm	±80mm	±295mm	±110mm	±475mm
ダンパー質量		5kg	15kg	250kg	75kg	50kg	850kg
シリンダ内径		35mm	95mm	200mm	90mm	85mm	175mm
ピストンロッド径		20mm	25mm	50mm	50mm	40mm	85mm
オリフィス	形　状	矩形	矩形	円環	円環	円環	円環
	外径（幅）×隙間	16×0.6mm	20×2mm	70×2mm	48×3mm	28×1.5mm	78×3mm
	磁場長さ	10mm	20mm	100mm	204mm	68mm	340mm
電磁石	直流抵抗	60Ω	60Ω	10.5Ω	12.0Ω／4 個	9.2Ω	19.2Ω／5 個
	インダクタンス	1500mH	1500mH	110mH	37.4mH／4 個	28.9mH	56.5mH／5 個
	最大印加電流	0.4A	0.4A	5A	3A	3A	3A
	最大消費電力	10W	10W	263W	108W×3	82.8W	691W
MR 流体		Lord MRF-132LD	バンドー化学 #230	バンドー化学 #104	バンドー化学 #230	バンドー化学 #230	バンドー化学 #230
減衰係数（磁場無印加）注4		0.012 kNs/cm	0.55 kNs/cm	8 kNs/m	0.08~0.14 kNs/cm	0.1~0.2 kNs/cm	1.3 kNs/cm

一方、前記の片ロッド式MRダンパー特性を踏まえて、日米スマートプロジェクト研究で三和テッキ社により開発された両ロッド式MRダンパーは、さらにMR流体の流路をシリンダー外部のバイパスとして設置してある。後者はやや大型化するものの、電磁石をシリンダーの外に設置することで、コイルの発熱を流体に伝えないため、温度上昇の影響を抑え

る事ができる。また、当研究は、初期が2kN(No.1)と20kN(No.2)[40]の長方形断面に形成されたオリフィスを有するMRダンパーを開発し、その後が円環状の長いオリフィス部を有するMRダンパー200kN(No.3)[41-42,46]や40kN(No.4制振用とNo.5大型実験免震用)[43-44]、400kN(実用化用)[45,47-48]が開発された。こちらの外側に置く型のコイルと円環状のオリフィスでは、電磁石の設計をより大容量のダンパー製作を容易とするなどの利点を有し、各種の試作ダンパーに関する一連の力学性能実験の結果が報告された。大容量のMRダンパーでは、米国では200kN級のMRダンパー[49](Yang, 2001)が開発された。MRダンパーにより吊橋に対する風力の振動制振が適用されているが、建物への実用化はまだ研究段階である。(本研究において第2章で開発した小型MRダンパーは円環状のオリフィスで両ロッド式を使用する。また、第6章で40kN級免震用MRダンパーによる数値シミュレーションを用い、このダンパーの構造と力学特性について記す。)

1.2.2 セミアクティブ制御技術の研究動向

表 1.4　セミアクティブ制御による建物

番号	建物名	竣工年	階数	制御装置（×本数）/方法	容量・ストローク
1	鹿島技術研究所21号館	1990	3	可変剛性(×6)/OnOff	700kN
2	鹿島静岡ビル	1998	6	オイルダンパー(×8)/Cont.	1,000kN, ±6cm
3	ラグサ大阪	1999	24	オイルダンパー(×2)/OnOff	1,300kN
4	慶応義塾大学理工学部創想舘（免震）	2000	7	オイルダンパー(×4)/OnOff	640kN
5	中部電力岐阜ビル	2001	11	オイルダンパー(×42)/OnOff	1,500kN, ±6cm
6	万代島ビル	2003	31	オイルダンパー(×72)/OnOff	72kN
7	汐留（タワー）鹿島ビル	2003	38	オイルダンパー(×88)/OnOff	1,500kN(Duox)
8	日本通運新本社ビル	2003	28	オイルダンパー(×60)/OnOff	1,500(HiDAX)
9	松下電工東京本社ビル	2003	25	オイルダンパー(×38)/OnOff	1,500(HiDAM)
10	六本木ヒルズ森タワー	2003	54	オイルダンパー(×356)/OnOff	2,100kN
11	トッパンフォームズビル	2003	19	オイルダンパー(×27)/OnOff	2,100kN
12	日本科学未来舘*	2003	8	MRダンパー(×2)/スカイフック オイルダンパー(×30)/パッシ	MRダンパー(300kN), ±12cm
13	都市基盤整備公団元住吉ビル*（免震）	2003	4	MRダンパー(×１)/スカイフック オイルダンパー(×2)/パッシ	MRダンパー（400kN), ±47.5cm オイルダンパー(500kN), ±
14	品川シーサイド・イーストタワー	2004	23	オイルダンパー(×28)/OnOff	1,500kN
15	東京プリンスパークタワー	2004	30	オイルダンパー(×66)/OnOff	2,100kN
16	慶応義塾大学三田南舘（免震）	2005	11	オイルダンパー(×10)/OnOff オイルダンパー(×10)/Passive	1,000kN(BM270)/OnOff
17	秋葉原ダイビル	2005	31	オイルダンパー(×42)/OnOff	1,500kN
18	日本橋三井タワー	2005	38	オイルダンパー(×96)/OnOff	2,100kN
19	虎ノ門タワーズ事務所棟	2006	23	オイルダンパー(×36)/OnOff	1,500kN

(註:*で示すのは建物への試用)

「制御」を利用する商品は、日常生活の中でも多く使われている。例えば、指定された室温を保つルームエアコン制御、パソコンのハードディスクにおけるデータを読み出すための磁気ヘッドの制御、自動車における乗り心地のためサスペンションの制御などである[50]。一方、建物構造への制御概念の導入に関しては、1950 年代に小堀が制振 5 原則[51]を提唱した。その 5 原則とは①地震力を伝達させない②地震動の主勢力を避ける③非共振化を図る④制御力を加える⑤エネルギー吸収に努める、である。即ち、以上の原則を把握すれ

ば、振動の低減または良い制御効果が期待できると考えられる。米国の Soong や Costantinou ら[52](1994)は積極的に制御による振動低減の研究を行っている。Loh[53](2003)は、近年台湾で建物や橋の構造物に対する振動制御の研究や適用を報告した。また、2005 年に竣工した高さ 508 メートルの超高層ビルは TMD を用い、風力による振動低減を主な目的としている[54]。

セミアクティブ制御装置について、1990-2006 年の間に実用化された建物[55]を表 1.4 に整理している。日本建築学会はセミアクティブの制御手法とダンパー種類により、今まで適用されたものを以下の通りに分類している[22]。①可変剛性型制御(No.1)②可変減衰型制御・セミアクティブオイルダンパー(No.2,5-11,14-15,17-19)③セミアクティブ免震(No.4,16)④セミアクティブ同調型マスダンパー(No.3)⑤可変摩擦ダンパー・可変スリップレベルダンパー⑥MR ダンパー(No.12,13)。この中で、制御弁の On/Off 切り替え型によるセミアクティブオイルダンパー制御が最も多く実用化され、制御則は最適制御(LQR 制御または LQG 制御)を適用している。また、可変摩擦ダンパー・可変スリップレベルダンパーと MR ダンパーはまだ研究段階である。

セミアクティブ制御では、地震動、風力による応答変位と応答加速度を共に低減させることが目的である。前記の日米スマートプロジェクト研究で、開発された 40kN の MR ダンパーによる大型 3 層免震鉄骨フレームの建物を対象建物として、各研究者から提案された種々の制御則によりセミアクティブ制振実験(2001-2002)を行った。各制御則でその制御理論と制御目標が異なること、かつ地震動の振動特性と入力レベルによる各制御則の低減効果の相違が確認された。下記は、各制御則により分類し、今まで行われたセミアクティブの研究を記す。

1)最適レギュレータ(Linear Quadratic Regulator、略称 LQR)制御・双線形最適制御・瞬間最適制御・準最適併合制御

藤田ら[56](1991)は、可変摩擦ダンパーを免震層に設置したセミアクティブ制御による免震構造を提案し、最適レギュレータによる免震モデル振動実験を行った。この摩擦ダンパーは、油圧アクチュエータを用いて摺動部の油圧を変化させ、摩擦による減衰力を調整するものである。倉田[57]らは解析により、周期の違いによる 4 種類のモデルに最適制御を用いて、制振効果を検証した。吉田ら[58]は、数値計算より、10 階の免震建物を対象として、制御の時間遅れを考慮し、双線形最適制御の有効性を検証した。1987 に Yang[59-60]は、建物の基礎にセンサーを配置すれば、各時刻の地動情報を得ることが出来るため、各時刻の地動加速度の情報を利用する瞬間最適制御を提案した。池田と小堀[61](1993)は、構造物の剛性を時々刻々変化させて振動低減を図り、瞬間最適制御法による可変剛性型制御システムを提案し、1 自由度系構造物に対して変位や速度、加速度に与えた重み係数の影響と制御効果を検証した。奈良岡ら[62-63](1991)はフィードフォワード併合制御手法によりフィードバック制御力とフィードフォワード制御力の両方を作用させると、フィードバック制御力だけを作用させる場合よりも構造物の応答が小さくなり、かつ必要な制御力のパワーも小さくなることが確認された。

2)スカイフック制御

Karnopp[64] (1974)は 1 質点系のサスペンションモデルを解析の対象として、スカイフック法による振動の低減効果を確認した。藤谷(2003)[65-66]はスカイフック法を MR ダンパーの制御に応用し、大型免震モデル実験より地震応答の低減効果を確認した。

3) On/Off 制御

丹羽ら[67] (1998)は、1000kN のセミアクティブの可変減衰ダンパーを実建物に応用した(表 1.4 の No.2)。諏訪ら[68] (2001)は 2 段階の 1,500kN 減衰係数切替え型ダンパーを地上 11 階の建物に適用した(表 1.4 の No.5)。田上ら[69](2004)はダンパー内部の油圧変動のみを利用して流量制御弁(プット弁)を自動的に開閉させることにより、外部エネルギーを極めてすくないということで、ON/OFF 型セミアクティブオイルダンパーHiDAX と同様の挙動をする全く新しいパッシブオイルダンパーを提案した。正弦波加振実験の結果により、HiDAX に類似した荷重変形特性を示し、従来型パッシブオイルダンパーを大きく上回るエネルギー吸収能力を発揮することが確認された。

4)EF(Energy Function)制御

塩崎ら[70-71] (2003)は免震層建物に対して、振動エネルギーを評価関数とする制御力を提案した。実大建物の振動台実験により、小振動に対しては小さな履歴ループ、大振動に対しては大きな履歴ループとなるように、履歴の大きさを振動レベルに依存させた制御として、評価関数を弾性歪エネルギーと運動エネルギーの和とし、評価関数の平方根に比例する制御力を発生させた場合には、大地震時に加速度を過大にする事無く免震層変位の抑制効果が高く、小地震時には両応答ともパッシブ制御による効果と同程度に抑えられることが認められた。

5)Fuzzy 制御

松本[72] (1990)は 1 層模型の振動実験を用い、ファジィによる応答制御を行った。山田ら[73] (1994)は 3 層鉄骨レーム試験体を対象モデルとして、最上階の応答速度のみを必要とするだけのファジィ制御アルゴリズムを用い、非線形履歴応答制御の検証を行った。Symans(1999)らは [74]免震橋梁モデルを解析対象として、可変オイルダンパーとファジィ制御による制振効果を検証した。Lin ら[75](2006)は、重さ 218kN の 1 質点系免震モデルと 300kN の MR ダンパーを用いてファジィ制御による振動台実験を行った。相対変位と絶対加速度を用いたフィードバック制御の有効性が確認された。

6)Neural Network 制御

谷ら[76] (1999)は、AMD を設置した 1 質点系構造物に対して、階層型ニューラルネットワーク（誤差逆転播法を使用）とファジィ理論により、最適適応予測制御システムを構築し、数値計算で制御効果を検討した。Schurter ら[77](2001)は、1 質点の制御モデルを想定して、応答加速度のフィードバックと ANFIS(Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems)を用

い、MR ダンパーによる応答低減効果を検証した。豊田ら[78](2004)は単孔式オイル式ショックアブソーバにオリフィス面積を調整する調整軸で、ファジィ推論法のメンバーシップ関数をニューラルネットワークの学習機能を用いて自動調整することにより、幅広い条件で緩衝が可能であることを確認した。白石ら[79] (2006)は、3 層の制振モデルと学習能力を有するニューラルネットワークを用い、解析より制御系をシステム同定用と制御用ネットワークを構成することで、MR ダンパーを使用する制御効果について検証した。

7) 予測制御

小堀ら[80] (1990) は「地震動の卓越周期から回避する非定常非共振」を実現するため、制御工学での観測器(Observer)を用いた「予測型適応制御」を提案した。1970 年代後半にモデル予測制御(Model Predictive Control, 略して MPC)が生まれ、大嶋、加納学[81-83]ら(2002)は、車の運転によりモデル予測制御の基本的考え方と、線形と非線形モデルでの定式化を示した。田中ら[84](2006)は、電磁石と永久磁石を併用した可変磁界を目的とするスポンジ型の MR ダンパーを開発し、非線形予測制御理論をセミアクティブ制御へと適用することを提案した。また、電流印加時に、減衰係数を大きくするだけでなく、小さくすることもでき、可変減衰範囲を拡大できる。堀内ら[85](2004)は、非線形予測制御の有効性を検討するため、モデル追従型非線形予測制御を提案し、車両の後輪操舵制御系設計に応用した。

8) 履歴制御

曽田ら[86](1997)は、1 質点と 5 質点(それぞれ周期とも 0.5sec)の構造モデルとして、最下階のみ可変減衰要素を設置し、層せん断力を直接に制御対象とするセミアクティブ制御の手法を提案した。この制御方法はダンパーの容量を、構造本体の抵抗力と粘性抵抗力との和を速度に応じて変更することとしていた。解析の結果により、構造物の変形、加速度の何れに対しても効果的な低減できると報告された。このセミアクティブ制御の提案は、履歴制御の先駆けである。岩田ら[87](2002)は、MR ダンパーを対象とした履歴ループ形状に基づく簡単な制御手法を提案し、その有効性を 1 質点と実大 3 層フレームの振動台実験として確認された。曽田ら[88](2002)は、免震建物の剛性をキャンセルする負の剛性を MR ダンパーに付加することで、MR ダンパーのセミアクティブ制御により実現することを行った。振動台実験結果より、最大変位、最大加速度を過大にすることなく、かつ片流れが抑えられることが確認された。茶谷、曽田ら[89](2004)は、300kN 級制振用の小型 MR ダンパーを開発した。制御則としては、ダンパー抵抗力の上限となる降伏荷重を設定し、さらに過大な変位が生じる時の建物の剛性の復元力による加速度上昇を防ぐため、第 1、3 象限ではその復元力とダンパー制御力の和が降伏荷重を超えないような負剛性を設定する。5 層小型鉄骨フレームの振動台実験の結果より、地震波によらず、変位を抑制しつつ最上階の加速度を低減していること、かつ各階の加速度のばらつきが少ないことが確認された。

1.2.3 MR ダンパーによる建物制御への実用化

前節の制御理論の研究とダンパーなどの制御装置の開発を踏まえ、アクティブ制御とセミアクティブ制御の適用が為されている。表 1.4 に記したように、可変剛性と可変減衰オイルダンパーによるセミアクティブ制御が既に建物に適用されている。MR ダンパーの場合は、車のサスペンションや電車、新幹線などの応用が報告されている。MR ダンパーを世界初として建物に試用したのは、日本科学未来舘と都市基盤整備公団元住吉職員宿舎となっている[48,90-91]。以下はその適用の概要を記す。

1)制振用 MR ダンパーの応用

2001 年 7 月竣工した日本科学未来舘は、地下 2 階地上 8 階の鉄骨建物である。制振ダンパーは、28 台の増幅てこ機構のオイルダンパーが設置され、かつ 300kN 級大容量両ロッド式の MR ダンパー(三和テッキ社開発)が採用される。MR ダンパーのストロークが±120mm で、最大速度が 50kine である。これらの低降伏鋼を用いた 2 重鋼管の増幅機構では、てこの原理を利用して、建物の層間変位または層間速度を拡大することで、ダンパーで吸収するエネルギーを増大し、建物の応答をより抑制する手法である。また、MR ダンパーの制御はスカイフック制御を利用し、層間相対速度の絶対値|V|によって印加電流（または減衰力）を 3 段階(①風力または小地震 0A：|V|≤5kine ②中地震 1A：5kine<|V|≤20kine ③大地震 2A：|V|>20kine)の切り替えとしている。

2)免震用 MR ダンパーの応用

2001 年 12 月竣工した都市基盤整備公団元住吉職員宿舎東棟は、地上 4 階の RC 建物である。この建物(総重量 2,058ton)の基礎には、9 個の積層ゴムアキュムレーターや、5 個の鉛ダンパー、オイルダンパー(500kN)2 台(長辺・短辺方向それぞれ 1 台)、MR ダンパー1 台(長辺方向)が設置される。MR ダンパーの制御力は、スカイフック制御則により、1 階床の相対速度の絶対値|V|に応じて、3 段階(①1A: V≤5kine ②2A: 15kine<V≤30kine ③3A: |V|>30kine)に変えられる。印加電流と地震観測は、1 階床に設置された加速度トリガー(20gal)を検知することより開始されるものである。記録されたデータは電話回線を介して財団法人建築研究所に転送される。また、MR は前述の制振・免震の実用化以外、建物への補強の適用も行われている[92]。

（注：上記の例では、表 1.4 の*に示すように、ダンパーとして必要な容量のごく一部のみを MR ダンパーに負わせている。完全に実用化された実例はない。）

1.3 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本研究の目的は MR ダンパーを設置した免震構造物において、免震層の変位と上部構造最上階の絶対加速度の両応答を、他のパッシブ制御による両応答よりも同時に下回ることを可能とするセミアクティブ制御則を策定する事である。以下の手順に従って検討を進めるものとする。

1)小型 MR ダンパーの開発、振幅や振動数、印加電流に依存する力学特性、ダンパー反応時間の遅れを検証し、ダンパー荷重のモデル化を行う。(第 2 章)

2)3 層鉄骨フレームおよび免震層付き 3 層フレームの設計および振動特性を検証することである。(第 3 章)

3)ファジィ制御と応答速度予測制御を提案し、ファジィ推論による制御則と応答速度予測による制御則を構築する。(第 4 章)

4)MR ダンパーを設置した免震構造物において、振動台実験を行い、パッシブ制御の定電流制御と速度比例減衰制御(オイルダンパー制御)、セミアクティブ制御の最適レギュレータ制御とスカイフック制御の制御効果との比較検討を行う。(第 5 章)

5)大型免震試験体を対象建物として、数値シミュレーションによりセミアクティブ制御の低減効果を検討する。(第 6 章)

1.4 論文の構成

本論文は全 7 章より構成される。

第 1 章では、序論として 1.1 節に研究の背景を述べ、1.2 節に既往研究の概要を示し、1.3 節に研究の目的を述べる。

第 2 章小型 MR ダンパーの設計では、小型免震用 MR ダンパーの構造と力学特性検証実験について記す。2.1 節には両ロッドのバイパス式ダンパーの構造を示す。次に、2.2 節には、ダンパーの単体実験を行うための加振装置と計測装置の概要を記す。2.3 節では、正弦波加振する際の振動数や振幅、コイルへの印加電流値をパラメータとするダンパー抵抗力の検証実験を行い、ダンパーの力学特性を把握する。次に、速度をパラメータとし、三角波加振中に急激な電流の立ち上げ、遮断を行い、目標荷重までの反応性・追従性を検証する。続く 2.4 節には、正弦波の実験結果をもとに、各加振パターンから得られた最大速度と最大抵抗力の関係によりダンパーの力学モデルの構築を示す。力学モデルとしては、減衰係数を可変とするダッシュポット要素、および摩擦力を可変とするクーロン摩擦要素を並列にして、拡張ビンカムモデル(Extended Bingham Model)を使用する。

第 3 章小型 3 層免震フレームの設計とその動特性では、小型 3 層免震フレームの設計と力学特性を記す。3.1 節には上部 3 層鉄骨フレーム(各階の重量約 60kg)の詳細を記し、ホワイトノイズ入力により構造の動特性を検証する。次に、3.2 節には、免震装置を記す。免震装置は、

摩擦力を低く抑えるためにアングル L-20×20×3 を利用した V 溝レール（×2 本）上を直径 50.5mm の鋼球（×4 個）が転がる単純な機構とする。その上に厚さ 9mm 鋼板の免震土台（1 階床）を設置する。続く 3.3 節には、免震付き建物モデルおよび振動特性実験を記す。上部構造の総重量は 3,001N、逆 V 型に設置した厚さ 4.5mm の鋼板バネの水平剛性は 18N/cm、鋼球が V 型溝を転がる際のクーロン摩擦力は約 2.3N となる。また、ホワイトノイズ入力により構造の動特性を検証する。

第 4 章セミアクティブ制御アルゴリズムでは、応答速度予測制御、振動台実験を実施する各パッシブ制御とセミアクティブ制御のアルゴリズムを示す。まず、4.1 節には、各パッシブ制御のパラメータを記す。4.1.1 項には、MR ダンパーのパッシブ使用とする定電流制御を示し、MR ダンパーに印加する定電流を 0A から 3A まで 0.5A ごとに作用させる。4.1.2 項には、MR ダンパーを用いて速度比例型オイルダンパーの力学特性を模擬する。ダンパーの抵抗力は建物モデルを一質点系(SDOF)の剛性比例減衰系としてその減衰定数が 10%, 20%, 30%, 40%に対応するように決める。次に、4.2 節には、各セミアクティブ制御則を記す。4.2.1 項はファジィ理論の仕組みやファジィルール、ファジィ推論を示し、応答速度と応答変位を用いた 2 次元のファジィルールによる制御力の構築方法を記す。4.2.2 節と 4.2.3 節には、それぞれセミアクティブ制御によく用いられている LQR 制御、およびスカイフック制御を示し、制御力によって時々刻々MR ダンパーに与える抵抗力の調整方法を記す。4.2.4 節には、免震層の相対速度の予測方法を示し、予測した速度により免震構造物に減衰力を付加する制御方法の提案を記す。

第 5 章小型 3 層免震フレームの振動台実験では、振動台実験に関する計測装置、制御装置、および振動台実験の結果に基づく各パッシブとセミアクティブ制御の手法による制振効果を比較検討した結果を記す。まず、5.1 節には、振動台や計測装置、制御システム、入力地震波の種類とレベルについて記す。次に、5.2 節には、前章で示したパッシブ制御とセミアクティブ制御を用いた振動台実験の結果、および免震建物において各階の最大応答変位と最大応答加速度、MR ダンパーの荷重変形関係、免震建物の応答変位と応答加速度のトレードオフ関係などの考察について記す。

第 6 章大型 3 層免震フレームのシミュレーション解析では、大型の 3 層免震建物モデルを検証対象に、レベル 2 に規準化した種々の地震波を用い、各パッシブとセミアクティブ制御のシミュレーション解析による地震応答の低減効果の結果を記す。6.1 節には、1998 年～2002 年の間に行われた日米共同研究で使用された 40kN の MR ダンパーと 3 層免震建物モデルの力学特性を記す。6.2 節には、解析モデルと状態方程式、入力地震波の種類とレベル、MATLAB/Simulink による数値シミュレーション解析の特徴と数値計算の方法を記す。6.3 節には、解析において、各パッシブ制御則とセミアクティブ制御則の種類とパラメータを記す。6.4 節には、シミュレーション解析の結果を示し、応答の時刻歴やダンパーの荷重変形、最大応答のトレードオフの関係により、パッシブにおいて CC 制御の 0A(無印加)、0.6A(最大印加電流)、CV 制御の減衰定数 h=30%、およびセミアクティブ制御の LQR 制御、SH 制御、FC 制御、FF

制御、SHC 制御の制振効果の比較検討を記す。

第 7 章では、各章得られた知見を総括して、本研究の結論を記す。

第１章の参考文献

1)日経コンストラクション: 土木が遭遇した阪神大震災～被害現場が教える地震防災へのヒント～、日経 BP 社、pp.1-72、1995
2)日経アーキテクチュア：阪神大震災の教訓「都市と建物」を守るため、いま何をなすべきか。日経 BP 社、pp.1-94、1995
3)溝上恵：巨大地震 VS 耐震施工、イースト・プレス、2003
4)桑原豊、小原隆、佐々木大輔：阪神大震災10年目の最出発、pp.66-94、日経アキィテクチョー、2005
5)清水建設免制震研究會：耐震、免震、制震のわかる本、pp.86-142、彰國社、1999
6)大橋雄二：構造強度規定の変遷と建築構造技術、第1回～建築法令と構造強度規定の変遷の概要～、建築技術、pp.189-195、1989
7)木村長仁ほか9名：建築構造設計者のための理～構造設計技術を如何に修得するか～、日本建築学会大会学術講演資料、pp.19-24(第2章：構造設計における設計法の選択)、2005
8)中田慎介：限界耐力計算法による耐震設計の理解～1 質点縮約モデルの地震応答を中心に～、pp.100-114、建築技術、2004
9)山内泰之ほか：限界耐力計算法の理解と活用、pp.96-168、建築技術、2001
10)北村春幸、北村佳久、伊藤優、坂本光雄：適用建物調査に基づく日本の応答制御構造の分析・評価、日本建築学会技術報告集、No.18、pp.55-60、2003
11)大橋雄二：地震と免震～耐震の新しいパラダイム～、朝倉書店、pp.186-215、1996
12)日本免震構造協会：免震構造入門、オーム社、pp.59-114、1995
13)深堀美英：免震住宅のすすめ～大地震から“家”と“家庭”を守るために～、講談社、2005
14)日本建築学会：耐震構造の設計～学びやすい構造設計～、pp.240-253(3.6 節:免震構造)、技報堂、3 版、2003
15)日本免震協会：免震建築～考え方・進め方～、pp.22-23、オーム社、2005
16)溜正俊、太田俊也、鴇田隆、河本慎一郎、吉村智昭、細澤治：平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震における小千谷市内の免震建物の挙動、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、p.653-658、2005
17)大類哲、竹中康雄、宮崎正敏、井上智晶：2004 年新潟県中越地震における長岡市内の学校免震建物での地震観測記録、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、p.659-660、2005
18)住宅産業研究所の調査による 2006 年 7 月までの「免震住宅」の棟数、Web ページ、http://www.ichijo.co.jp/technology/menshin/
19)鈴木裕美、中川理ほか：免震補強構法の事例、建築技術、pp.174-178、2004
20)増田剛：築 140 年の伝統木造建築を免震化、日経アーキテクチュア、pp.86-87、2006
21)山口昭一、井上一博、伊藤栄俊、岩間和博：タームナルビルの中間免震化によるレトロ

フィット免震（新宿小田急百貨店)、建築技術、pp.150-151、No.651、2004
22)日本建築学会、アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状、pp.26-87、2005
23)財団法人住宅保証機構～住宅保証制度について～、Web ページ、http://www.ohw.or.jp/
24)日米共同構造実験研究「高知能建築構造システム開発」技術調整委員会，独立行政法人建築研究所，国土交通省国土技術政策総合研究所，（財）日本建築センター：日米共同研究「高知能構造システムの開発」報告書、pp.IV38-IV133、平成 10 年度
25)Rabinow, J.：The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Trans., Vol.67, pp.1308-1315, 1948
26)Weiss, K. D., Duclos, T. G., Carlson, J. D., Chrzan, M. J. and Margida, A. J.：High Strength Magneto- and Electro-rheological Fluids, Society of Automotive Engineers, SAE paper ＃932451, 1993
27)Calson, J. D., Catanzarite, D. M. and Clair, K. A. St.：Commercial Magneto-rheological Fluid Devices, 5 th Int. on Electro-Rheological, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology, Sheffield, 1995.7
28)Carlson, J. D.：Magneto-Rheological (MR) Fluid Dampers, Workshop on Application of Various Protective Systems to Bridges and Structures, pp.261-273, Taipei, 1996.1
29)Yang, J. N.：Overview of Protective Systems, Workshop on Application of Various Protective Systems to bridges and Structures, pp.1-71,Taipei, 1996.1
30)Spencer, Jr., B.F., and Sain, M.K. ：Controlling buildings: A New Frontier in Feedback, Control Systems, IEEE, Vol.17, No.6, pp19–35, 1997
31)森下信：電気粘性流体および磁気粘性流体の基本特性とその応用、第 48 回理論応用力学講演会論文集、日本学術会議、pp.443-446、1999
32)日米共同構造実験研究「高知能建築構造システム開発」技術調整委員会，独立行政法人建築研究所，国土交通省国土技術政策総合研究所，（財）日本建築センター：日米共同研究「高知能構造システムの開発」報告書、平成 11-12,14 年度
33)荒木伸介、畑克彦、外村卓也、藤谷秀雄、森下信、曽田五月也: 高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究(その 29)新規 MRF の創製と評価、B-2 分冊、p.239-240、2001
34)外村卓也、畑克彦：分散安定化磁気粘性流体（MRF）の開発、B-2 分冊、pp.661-662、2002
35)中谷訓之、白石俊彦、森下信：MR ダンパーによる構造物の制振、第 2 回ダンピングシンポジウム講演論文集、pp.110-114、2002
36)藤谷秀雄、畑克彦、森下信、曽田五月也：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究（その 12）磁気粘性流体の基本特性とその応用研究の概要、日本建築学会大会学術梗概集、pp.913-914、2000
37)樋渡健、萩原伸彦、藤谷秀雄：環境温度を考慮した MR ダンパーによる振動制御、日本地震工学会大会梗概集、pp.176-177、2005
38)北山昌尚、岩田範生、曽田五月也：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験

研究（その 13）小型 MR ダンパーの力学特性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、 pp.915-916、2000

39)Lord 社製 Motion Master RD-1005-3：Web ページ http://www.lord.com/tabid/3361/Default.aspx

40)袖山博、砂子田勝昭、藤谷秀雄、曽田五月也、岩田範生：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究(その 14)2kN 級、20kN 級 MR ダンパーの開発、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.917-918、2000

41)小松豊、袖山博、畑克彦、藤谷秀雄、砂子田勝昭：同（その 15）200kN 級 MR ダンパーの開発、B-2 分冊、pp.919-920、2000

42)小松豊、藤谷秀雄、袖山博、畑克彦、砂子田勝昭、曽田五月也：同（その 30）200kN 級 MR ダンパーの基本特性、B-2 分冊、pp.241-242、2001

43)楠本玄英、岩田範生、曽田五月也、袖山博、砂子田勝昭：同（その 31）バイパス式 MR ダンパーの力学特性に関する実験と解析、B-2 分冊、pp.243-244、2001

44)砂子田勝昭、袖山博：同（その 32）ＭＲダンパーの設計手法に関する基礎的研究年、B-2 分冊、pp.245-246、2001

45)袖山博、砂子田勝昭、藤谷秀雄、曽田五月也、塩崎洋一、樋渡健：同（その 52）大型実験用 MR ダンパーの基本特性、B-2 分冊、pp.927-928、2002

46)茶谷良介、曽田五月也、楠本玄英、袖山博：同（その 53） 各種 MR ダンパーの力学特性に関する実験的研究、B-2 分冊、pp.929-930、2002

47)袖山博、砂子田勝昭、藤谷秀雄、樋渡健、塩崎洋一、外村卓也：同（その 81）実免震建物用 MR ダンパーの基本特性、B-2 分冊、pp.909-910、2003

48)袖山博：大容量 MR ダンパーの開発に関する研究、博士論文、pp.129-192、東京都立大学、2004

49)Yang, G. : Large-scale MR Fluid Dampers~ Modeling, and Dynamic Performance Considerations~, Ph.D dissertation, University of Notre Dame, 2001

50)木村英紀：制御工学の考え方～産業革命は「制御」からはじまった～、講談社、2004(3 版)

51)大田外気晴、江守克彦、河西良幸：耐震・振動・制御、pp.247-276、共立出版株式会社、2003(2 版)

52)Soong, T.T. and Costantinou, M.C. : Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, Springer-Verlag Wien, New York, 1994.

53)Loh, C. H. : Structural Control Research in Taiwan, Proc. of the 3rd World Conference on Structural Control, Como, Italy, Vol.1, pp.115-124, 2003

54)青垣英夫、井上明、遠藤明祐、遠藤輝一、吉松賢二：TAIPEI 101（台北国際金融センター）建設工事～高さ世界一の超高層ビルにおける施工と構造技術～、建築技術、pp.178-188、2004

55)池田芳樹：日本における建築構造物のアクティブ・セミアクティブ振動制御、第 12 回地

震工学シンポジウム、pp.77-81、2006
56)藤田隆史、壁矢和久 、速水浩、相沢覚、東野雅彦 、久保智史、羽生田信良、森孝之：可変摩擦ダンパーを用いたセミアクティブ免震構造の研究（第１報、可変ダンパーの開発とセミアクティブ制御システムの基礎的研究）、日本機械学会論文集(C 編)、Vol.57、No.536、pp.48-54、1991
57)Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M. and Naoki, N. : Semi-Active Damper System in Large Earthquakes, Proc. 2nd World Conf. on Struct. Control, Vol.1, pp.359-366, Kyoto, 1998
58)吉田和夫、藤尾忠洋：双線形最適制御理論に基づくセミアクティブ制御の建物免震への応用、日本機械学会、Dynamics and Design Conference、CD-ROM、2000
59)Yang, J. N., Akbarpour A. and Ghaemmaghami P. : New Optimal control Algorithms for Structural Control, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.113, No.9, pp.1369~1386, 1987
60)小堀鐸二：制震構造～理論と実際～、pp.33-90、鹿島出版会、1993
61)池田芳樹、小堀鐸二：瞬間最適制御手法による 1 自由度系構造物の可変剛性型制御システム、日本建築学会構造系論文報告集、No.435、pp.51-59、1993
62)奈良岡浩二、勝倉裕：構造物の振動の実現可能な準最適併合制御に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.424、pp.125-134、1991
63)奈良岡浩二、勝倉裕：未来の入力情報を利用するフィードフォワード併合制御に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.438、pp.75-81、1992
64)Karnopp, D., Crosby M.J. and Harwood R.A.: Vibration Control Using Semi-active Force Generators, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, pp.619-626, 1974
65)藤谷秀雄、樋渡健、塩崎洋一、曽田五月也：MR ダンパーによる免震構造のスカイフック制御実験、日本建築学会構造工学論文集、Vol.49B、pp.105-110、2003
66)藤谷秀雄、渡辺一弘、井上波彦、樋渡健、曽田五月也：MR ダンパーの実用化に向けた試み、日本地震工学会大会学術梗概集、pp.178-179、2005
67)Niwa, N., Kobori T., Takahashi M., Mathunaga Y., Kurata N. and Mizuno T.: Application of Semi-active Damper System to an Actual Building, Proc. 2nd World Conf. on Struct. Control, Vol.1, pp.815-824, Kyoto, 1998
68)諏訪政雄、杉山武、森不可止、田上淳、栗野治彦、福島出、清水幹：減衰係数切替え型セミアクティブダンパーを適用した中層建物の振動実験（その 1）建物概要および加振実験時の建物条件、日本建築学会大会学術梗概集、B-2、pp.261-262、2001
69)田上淳、松永義憲、栗野治彦、山田俊一：エネルギー吸収に着目した ON/OFF 型パッシプオイルダンパー、鹿島技術研究所年報告、No.52、2004
70)塩崎洋一、樋渡健、藤谷秀雄、曽田五月也：MR ダンパーを用いた免震構造物の簡易なセミアクティブ制御に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.570、pp.37-43、2003
71)Shiozaki, Y., Hiwatashi T., Fujitani, H., Iiba M., Hata K., Sunakoda K. and Soda S. : Study of

response control by MR Damper for base-isolated building, Proc. of the 3rd World Conference on Structural Control, Como, Italy, Vol.2, pp.137-142, 2003

72)松本尚志、有泉浩蔵、原田和明：ファジィ理論の振動制御への応用～その 1：単純な 1 層模型による振動実験～、日本建築学会学術梗概集、pp.843-844、1990

73)山田登志郎、鈴木宏一、小林創：ファジィ理論による建築構造物の非線形履歴応答制御～ファジィ理論の建築構造物の地震応答制御への適応性に関する研究～、日本建築学会構造系論文集、No.466、pp.59-68、1994

74)Symans, M. D.and Kelly S. W. : Fuzzy Logic Control of Bridge Structures using Intelligent Semi-active Seismic Isolation Systems, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.28, pp.37-60, 1999

75)Lin, P. Y., Roschke, P. N. and Loh, C. H. : Hybrid Base-isolation with Magnetorheological Damper and Fuzzy Control, Struc. Control Health Monit.(in press) 2006.

76)谷明勲、河村廣：階層型ニューラルネットワークおよびファジィ理論を用いた建築構造物の最適適応予測制御システム、日本建築構造系論文集、No.458、pp.179-189、1994.4

77)Schurter, K. C. and Roschke, P. N: Neuro-Fuzzy Control of Structures using Acceleration Feedback, Smart Mater. Struct. Vol.10, pp.770-779, 2001

78)豊田恭孝、江上正：セミアクティブショックアブソーバのインテリジェント制御、日本機械学会論文集、C 編、70 券 698 号、2004

79)白石俊彦、中谷訓之、森下信、藤谷秀雄：MR ダンパーを設置した実大建築構造模型ニューラルネットワークによる制振、日本建築学会構造系論文集、Vol.52B、pp.261-266、2006

80)小堀鐸二、鎌形修一：予測型適応制御による可変剛性型制震システム、日本建築学会構造系論文報告集、No.416、pp.125-133、1990

81)大嶋正裕、小河守正：モデル予測～Ⅰ基礎編：発展の歴史と現状～、システム/制御/情報、Vol.46、No.5、pp.286-293、2002

82)加納学、大嶋正裕：モデル予測～Ⅱ：線形モデル予測制御～、システム/制御/情報、Vol.46、No.7、pp.418-424、2002

83)大嶋正裕、関宏也：モデル予測～Ⅴ：非線形モデル予測制御～、システム/制御/情報、Vol.47、No.1、pp.52-57、2003

84)田中喬、渡辺亨、背戸一登：非線形予測制御によるセミアクティブ制御と可変減衰範囲を拡大した MR ダンパー、日本機械学会論文集、C 編、72 券 714 号、2006

85)堀内伸一郎、岡田一行、納富信也：確定外乱を考慮したモデル追従非線形予測制御とその車両運動制御への応用、日本機械学会論文集、C 編、70 券 698 号、2004

86)曽田五月也、濱智貴、岩田範生：セミアクティブ可変減衰装置によるせん断力の制御と建築物の制振、D&D'97　21 世紀のダンピング技術シンポジウム講演論文集、pp.283-286 日本機会学会、1997

87)Iwata, N., Sodeyama, H., Sunakoda, K., Hata, K., Hiwatashi T., Shiozaki, Y., Fujitani, H. and Soda, S. : Experimental Study of the Effectiveness of a Simple Semi-active Control Algorithm for Base-Isolated Structures, pp.1761-1766, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 2002

88)曽田五月也、楠本玄英、茶谷良介、岩田範生、藤谷秀雄、袖山博：バイパス式 MR ダンパーによる建築物のセミアクティブ制御に関する研究、pp.1925-1930、第 11 回日本地震工学シンポジウム、2002

89)曽田五月也、茶谷良介：MR ダンパーによる 5 層フレーム試験体のセミアクティブ振動制御に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B-2、pp.31-34、2004

90)Sodeyama, H., Suzuki, K. and Sunakoda, K. : Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper using Magneto-rheological Fluid, Jour. of pressure vessel Tech., pp.105-109, 2004

91)Fujtani, H., Sodeyama, H., Tomura, T., Hiwatashi, T., Shiozaki, Y., Hata, K., Sunakoda, K. , Morishita, S. and Soda, S. : Development of 400 kN Magnetorheological Damper for a Real Base-isolated Building, proc. of SPIE, Vol. 5052, pp.265-276, 2003

92)東亜建設工業(株)、任意に抵抗力を制御できる制振ダンパーを初適用、No.681、 pp.62、建築技術、2006

第２章

小型 MR ダンパーの設計

MR ダンパーの基本構造は、一般に知られるオイルダンパーと同様であるが、シリンダーの中に封入される流体はオイルの代わりに磁気粘性流体（以下、MR 流体）を用いる。MR 流体は、磁場の作用により見かけの粘度が変化するため、MR ダンパーは流路中の流体に印加する磁場の強さを調節することで抵抗力を可変できる。一方、MR 流体は単なるオイルとは異なり、ベースオイル中に分散質が存在する。その分散質はベースオイルよりもはるかに比重が大きく、沈降することが知られている。MR ダンパーはその沈降安定性がよくない場合において抵抗力の高出力を招く恐れがある。さらに、長期間にわたって構造物に設置される MR ダンパーはその沈降で時間的な性能変化を起こし、突如生じる外乱の制振装置として意図した抵抗力を発揮できない可能性もある。したがって、ダンパーに用いる際の MR 流体の開発の留意点として、①沈降安定性、②せん断応力、③経時変化が挙げられ、これらがダンパーの性能評価を左右する大きな要因となる [1-2]。

本章では以上の背景を踏まえ、小型 MR ダンパーを設計・製作し、ダンパーの力学特性を検討する。2.1 節では、小型免震用ダンパーの構造について述べる。2.2 節では、ダンパーの力学性能を確認するために、単体実験を行い、計測装置および実験装置を記す。MR ダンパーは、磁場作用の変化による抵抗力の可変範囲が広く、速度に依存する抵抗を極力抑制できた方が抵抗力の制御を行いやすい。さらに、連続振動に対する制御抵抗力を制御指令に基づき、瞬時に抵抗力が発揮されることが望まれる。そこで、2.3 節では、正弦波加振する際の振動数や振幅、コイルへの印加電流値をパラメータとする単体実験を行い、ダンパーの力学特性を把握する。次に、ダンパー加振中に急激な電流の立ち上げ、遮断を行い、目標荷重までの反応性・追従性を検証する。続く 2.4 節では、正弦波の実験結果をもとに、ダンパーの力学モデルを構築する

2.1　ダンパーの構造

MR ダンパーの種類は、図 2.1 と 2.2 に示すように、片ロッド式と両ロッド式に分けられている。1.2.1 節に示すように、Load 社が開発した MR ダンパーは片ロッド式であり、日米

スマート研究プロジェクトで三和テッキ社が、種々の大型実験用や大容量実用化用などの両ロッド式の MR ダンパーを開発した。曽田と茶谷ら[3-4]（2004）は、セミアクティブ制振用 MR ダンパー（300N 級，ストローク±2cm）を開発し、小型 5 層フレームに対する各種セミアクティブ振動制御の有効性を確認した。両ロッド式の 100N 級免震用 MR ダンパーの構造[5]を図 2.3 に示す。圧力室（Cylinder）、バイパス流路（Bypass Flow）、アキュムレーター（Accumulator）の 3 部分により構成される。内径 30mm のシリンダー内でピストンが移動する時に、内蔵される MR 流体は内径 18mm のバイパス流路を経由して移動する構造となっている。表 2.1 に諸元の一覧を示す。バイパス部[6-7]には 7mm の鉄芯を入れ（オリフィス隙間 5.5mm）、電磁石は 2 個のコイル（写真 2.2）を直列に配置し、電流の大小に応じて磁界が変化して MR 流体のせん断降伏応力も変化する。温度と圧力による流体の体積変化の影響を除くために、アキュムレーターが設置され、圧力はハンドポンプ（写真 2.3）を用いて 0.2Mpa 程度に調整・維持している。MR 流体は写真 2.1 で示したバンドー化学（株）製の MR 230 を封入している。

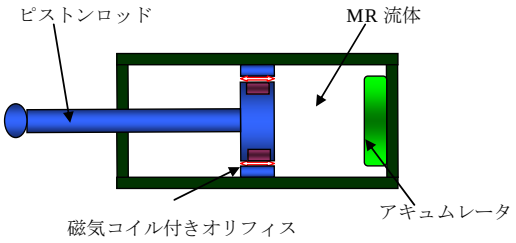


図 2.1 方ロッド式 MR ダンパーの構造

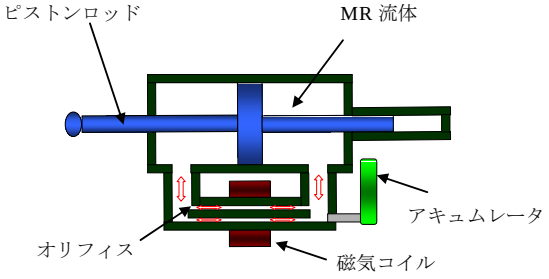


図 2.2 両ロッド式 MR ダンパーの構造

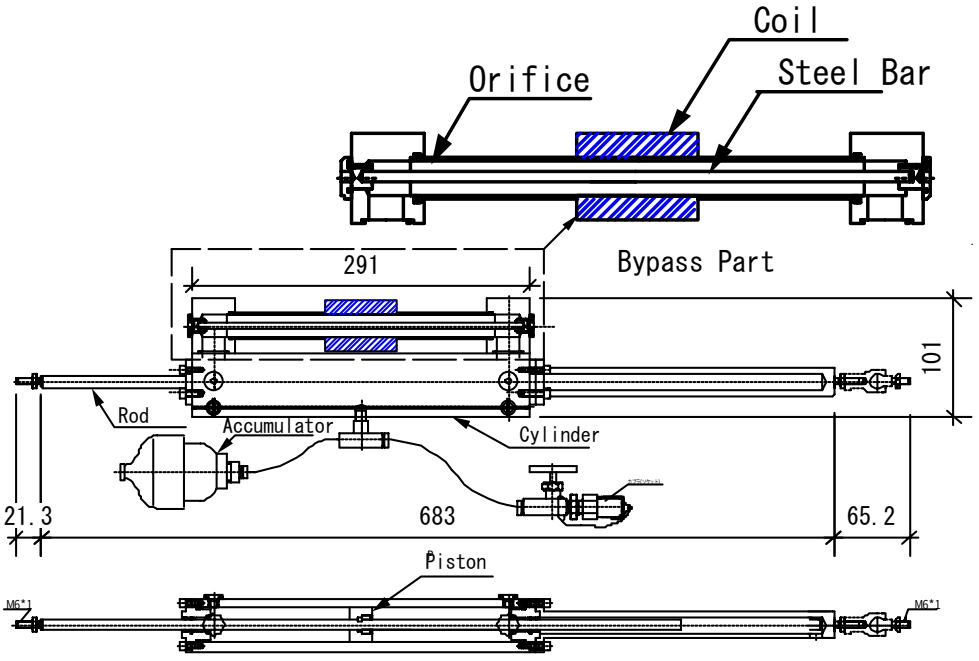


図 2.3　100N 級免震用 MR ダンパーの構造図（単位：mm）

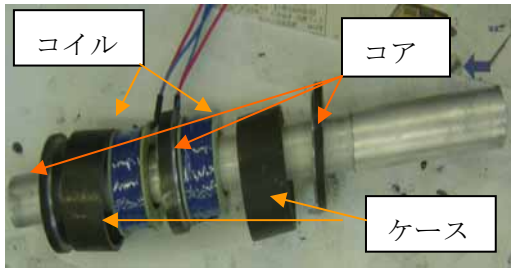
表 2.1 小型 MR ダンパーの諸元

項 目		仕 様
Maximum Force		100N
Maximum velocity		30cm/sec
Stroke		24cm(±12cm)
Diameter of Cylinder Bore		30mm
Diameter of piston rod		10mm
Orifice(Steel bar)		5.5mm(φ7mm)
Electromagnet	Coil Cycles	600T×1
	Resistance	10.3Ω×1
	Max.Voltage	DC6V×2
MR fluid		#230(Bando Chemistry)
Weight		45N

写真 2.1 ＃230 MR 流体
（バンドー化学社）

写真 2.3 ハンドパンプ(P-18B)
（理研精機社）

(a) コイル分解前



(b) コイル分解後

写真 2.2 コイルの構造

2.2　性能確認の実験システム

100N 級の MR ダンパーの減衰力特性を確認するために、アクチュエータによる加振実験を実施した。試験体である 100N 級 MR ダンパーの設置図を図 2.4、加振の様子を写真 2.4 に示す。MR ダンパーの加振には 30kN アクチュエータを使用し、ダンパー設置に際しては、ダンパーのピストンが中立位置にあるようにアクチュエータのロッド位置を調節した。続いて、ダンパーロッドとピン接合部の間に変位測定用の冶具を設け、ダンパーのピストン変位の計測は、ダンパーの付近に設置した巻込変位計（東京測器研究所、DP-500）により計測した。一方、ダンパーの抵抗力はロードセル（東京測器研究所、TKA-50A）により計測した。これらの計測器から出力されるひずみデータはそれぞれ動ひずみアンプ（東京測器研究所、SDA-810）を介して電圧出力され、PC に内蔵した A/D 変換ボードによりディジタルデータとして計測される。また、ダンパーに設置された磁場を発生させるコイルへの電流印加には安定化電源（菊水電子工業、PBX40-10、写真 2.5）を用い、定電流モードにより直流電流を出力する。

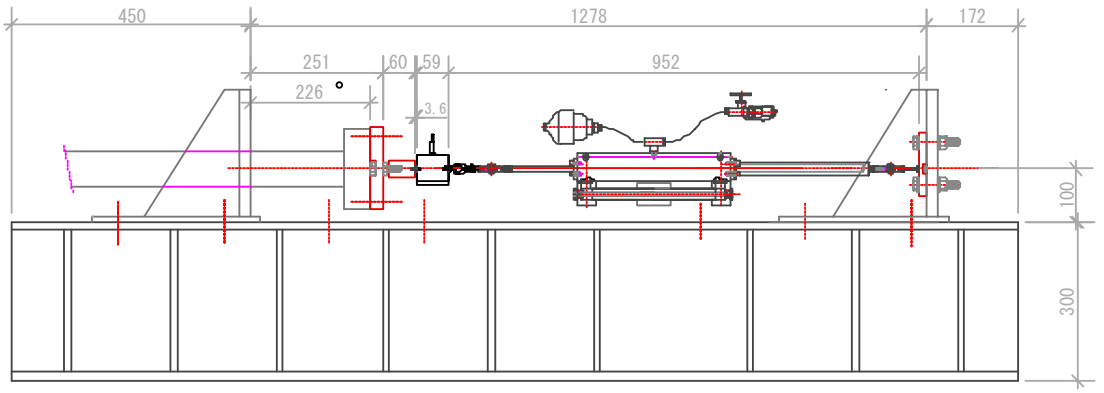


図 2.4　試験体設置図

写真 2.4　MR ダンパー加振写真

写真 2.5　直流電源装置
(菊水電子工業、PBX40-10)

2.3　ダンパーの動力学特性

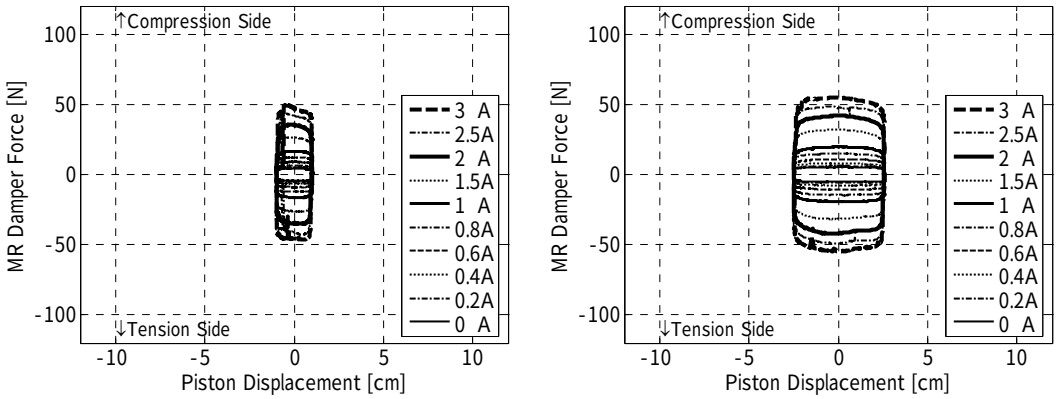
2.3.1 正弦波加振実験

MR ダンパーの力学特性を検証するため、コイルに 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5, 3A の一定電流を印加し、正弦波繰り返し加振実験を行った。表 2-2 に示す振動数と振幅の組み合わせで正弦波加振を行い、MR ダンパーの基本的な履歴形状や印加電流の変化に伴う特性変化への影響を検証する。ただし、表の○印の組み合わせについては実験を行ったが、×印に関してはアクチュエータの性能上、指定する加振条件の実現が困難であるため行わなかった。

表 2.2　正弦波加振における振動数と振幅の組合せ

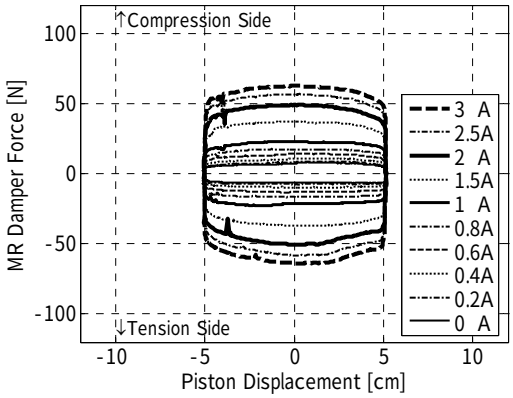
		振動数[Hz]					
		0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00
振幅[mm]	10	○	○	○	○	○	○
	25	○	○	○	○	○	×
	50	○	○	○	○	×	×
	100	○	○	×	×	×	×

実験結果を図 2.5-2.10 に示す。ダンパー荷重は、印加電流とピストン速度(振動数)が増加するとともに上がり、ダンパー荷重とピストン変位の関係は常に安定した履歴を描いている。MR ダンパーは電流無印加の場合にはオイルダンパーの力学特性に良く似て荷重変形関係が概ね楕円状の履歴を描くが、ピストンとシリンダー間およびピストンロッドシール部分において若干の摩擦力が生じることの影響が変形のピーク(速度=0)点で認められる。なお、本研究では、図 2.2 においてピストンの右方向への移動時の抵抗力を圧縮（正）と定義している。また、筆者ら[8)]（2005）は本ダンパーを用い、オリフィスの違いによる減衰力の影響を検証した。実験の結果より、オリフィスの小さいほどダンパー荷重が大きくなることが確認された。

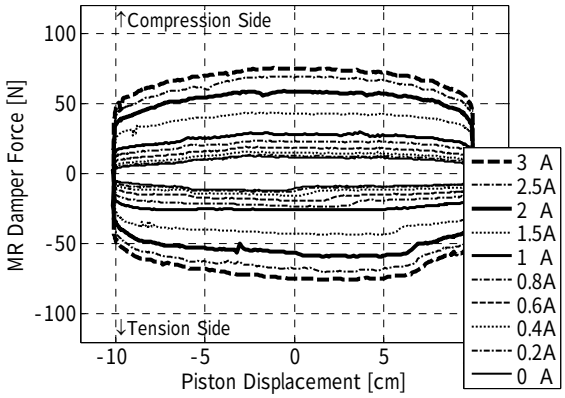


(a) 振動数 0.1Hz，振幅 10mm　　(b) 振動数 0.1Hz，振幅 25mm

図 2.5　ダンパーの履歴特性

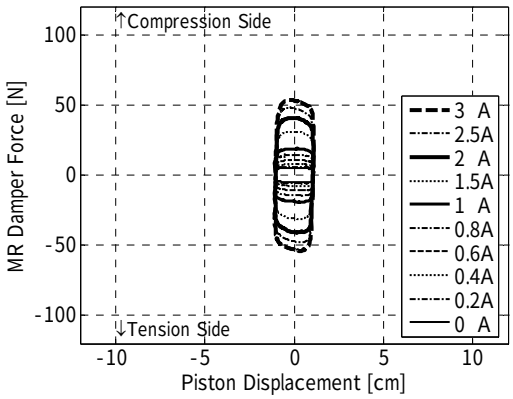


(c) 0.1 振動数 Hz，振幅 50mm

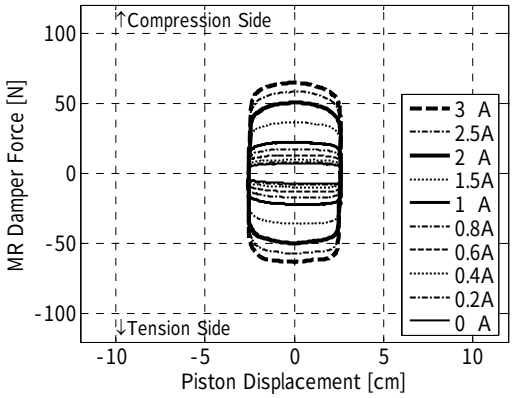


(d) 振動数 0.1Hz，振幅 100mm

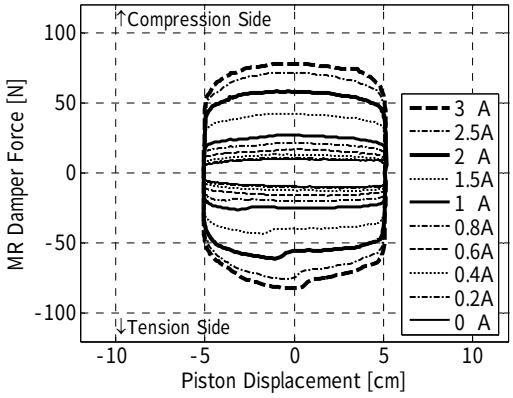
図 2.5　ダンパーの履歴特性



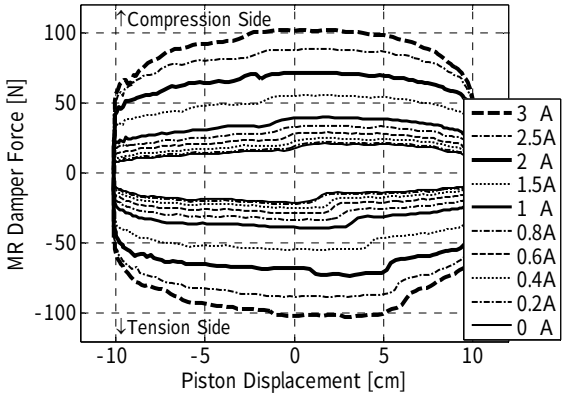
(a) 0.25 振動数 Hz，振幅 10mm



(b) 0.25 振動数 Hz, 振幅 25mm

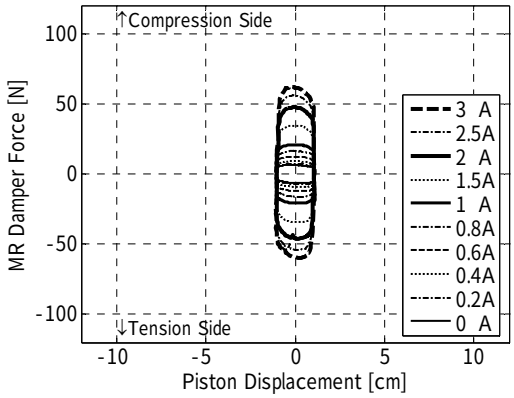


(c) 振動数 0.25Hz, 振幅 50mm

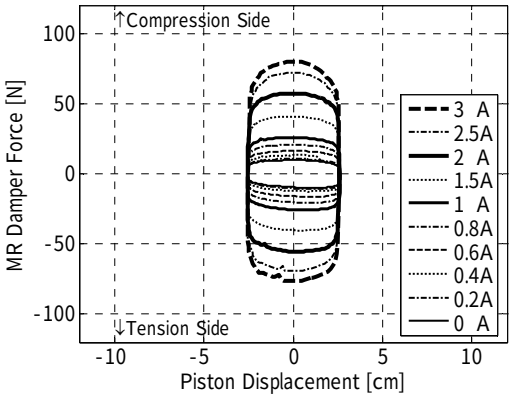


(d) 振動数 0.25Hz，振幅 100mm

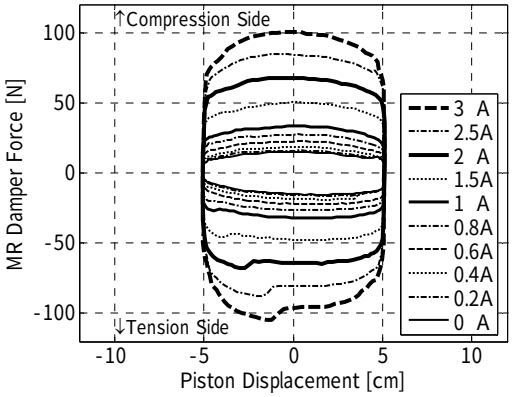
図 2.6　ダンパーの履歴特性



(a)振動数 0.5Hz，振幅 10㎜

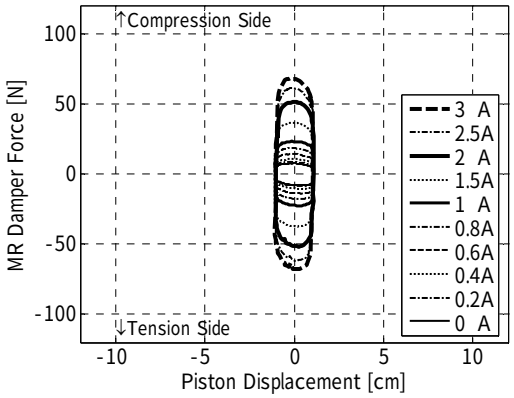


(b)振動数 0.5Hz，振幅 25㎜

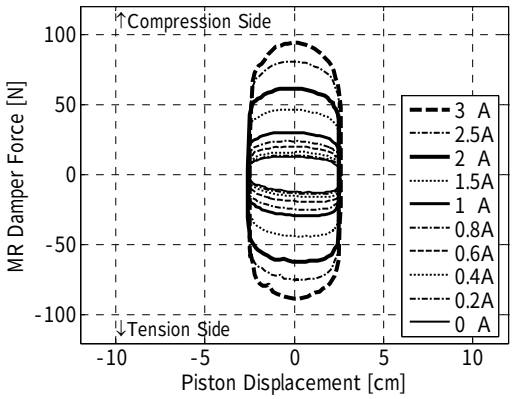


(c)振動数 0.5Hz，振幅 50㎜

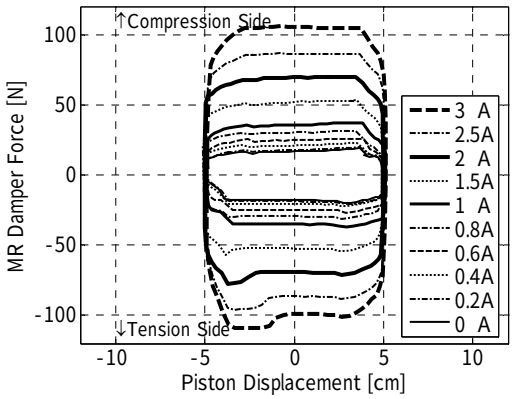
図 2.7　ダンパーの履歴特性



(a)振動数 0.75Hz，振幅 10㎜

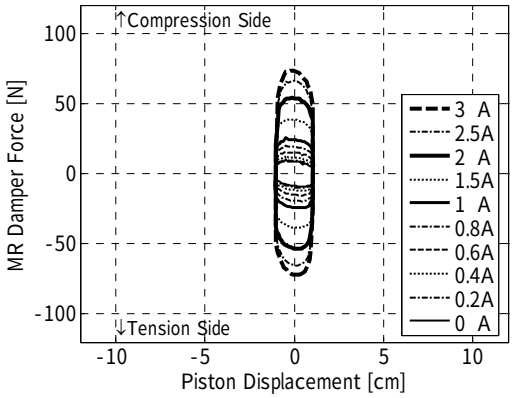


(b) 振動数 0.75Hz，振幅 25㎜

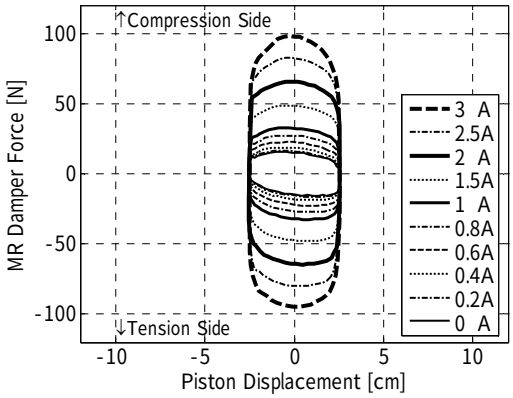


(c)振動数 0.75Hz，振幅 50㎜

図 2.8　ダンパーの履歴特性

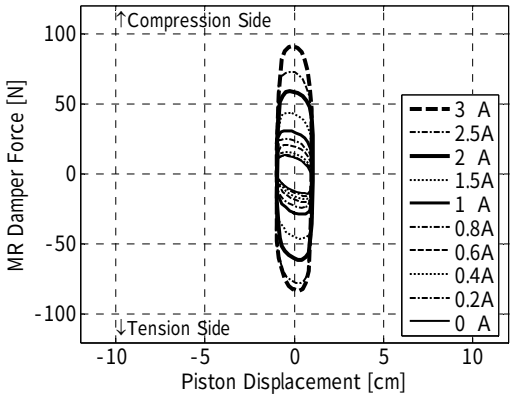


(a)振動数 1Hz，振幅 10㎜



(b)振動数 1Hz，振幅 25㎜

図 2.9　ダンパーの履歴特性



振動数 2Hz，振幅 10㎜

図 2.10　ダンパーの履歴特性

また、上記単体実験の各加振条件に最大荷重と最大ピストン速度の関係をプロットしたものが図 2.11 であり、同図中の実線は最小自乗法により直線で近似したものである。電流値を 0~3A と変える事によるダンパーの減衰力の可変幅は、ピストン速度が遅い場合に約 0~50N、ピストン速度が早い場合には、10~100N となることよりセミアクティブ制御に十分適用できると判断した。

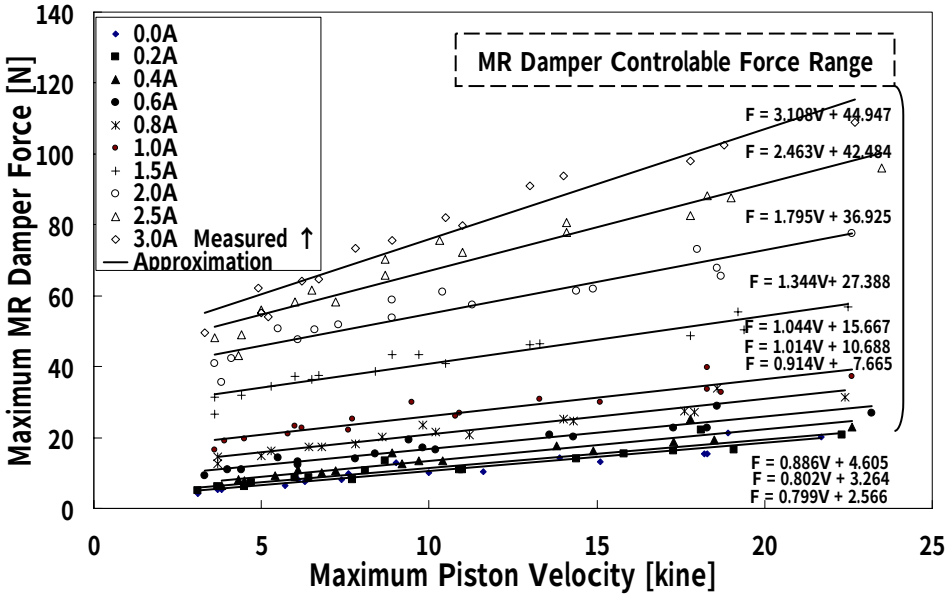


図 2.11 MR ダンパーの最大荷重-最大ピストン速度関係

2.3.2 電流変化に対するダンパー抵抗力の反応性の検証

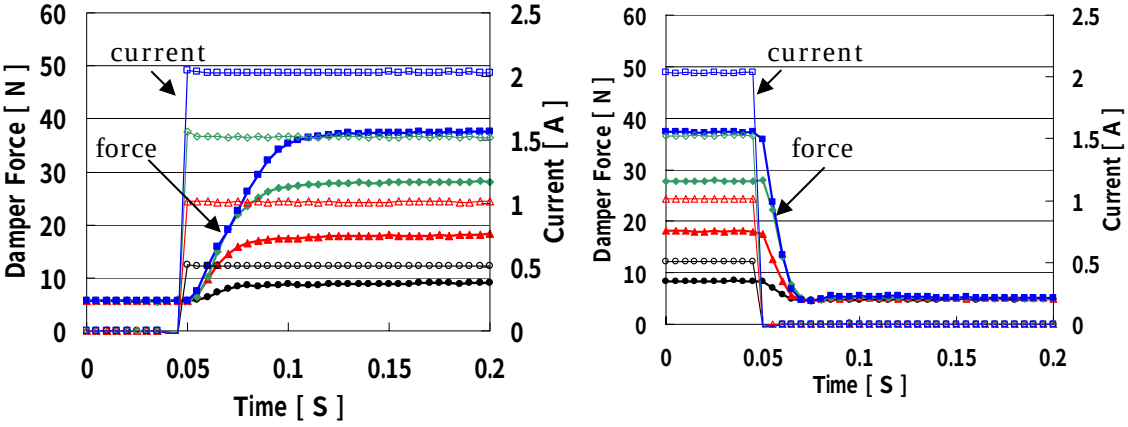
三角波での加振中に電流の急激な立ち上げ、遮断を行った。加振条件および印加電流パターンを表 2.3 に示す立ち上げ，遮断ともに 4 通りである。ピストン速度の違いによる急激な電流変化に対する抵抗力の反応性を検証する。

表 2.3 加振条件および電流印加パターン

振幅[mm]	振動数[Hz]	電流印加方法
20	0.05	<電流立ち上げの場合> 0 A → 0.5 A, 0 A → 1.0 A 0 A → 1.5 A, 0 A → 2.0 A <電流立ち下げの場合> 0.5 A → 0 A, 1.0 A → 0 A 1.5 A → 0 A, 2.0 A → 0 A
	0.1	
	0.2	
	0.3	
	0.4	

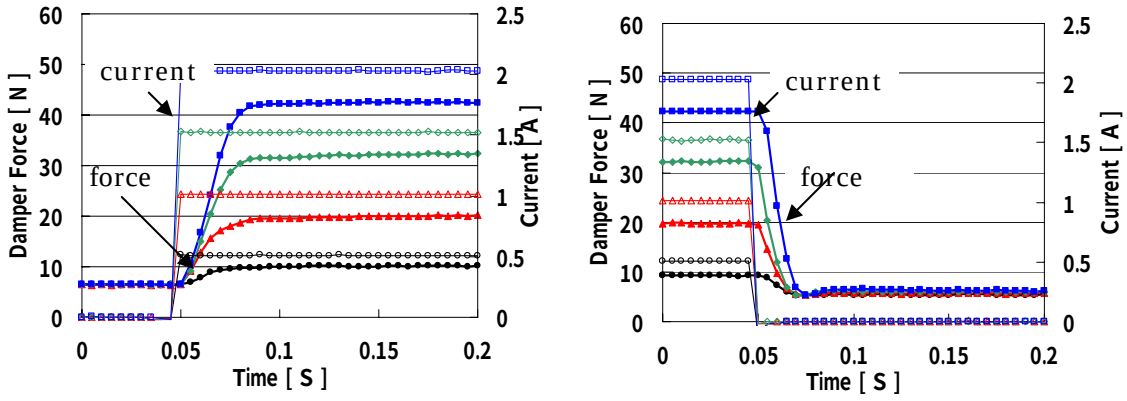
上記の三角波による加振中に電流を急激に変化させて、電流変化に対するダンパー抵抗力の追従性を検証した結果を図 2.11-2.16 に示す。反応時間は電流値の変化幅には依存しない。0A→2.0A 電流立ち上げ時には、0.05Hz で 0.05 秒、0.4Hz で 0.02 秒程度の遅れで所定の荷重に達することが確認できる。他の電流立ち上げ時には、より早く所定の荷重に達する

ことが確認できる。一方、電流遮断時には、何れの振動数においても 0.02 秒程度の遅れで所定の抵抗力が得られる。



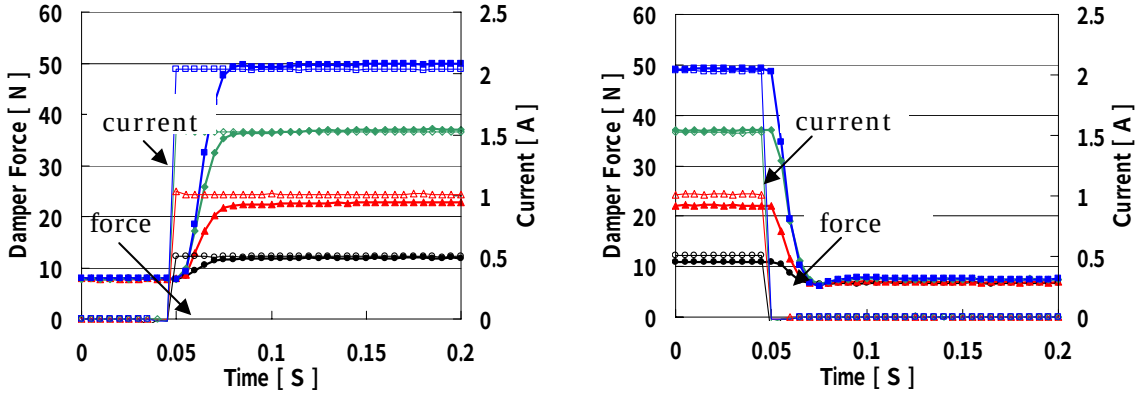
(a)電流立ち上げ時　　(b)電流遮断時

図 2.12 ピストン速度の違いによる荷重変化(振動数 0.05Hz, 振幅 20mm)



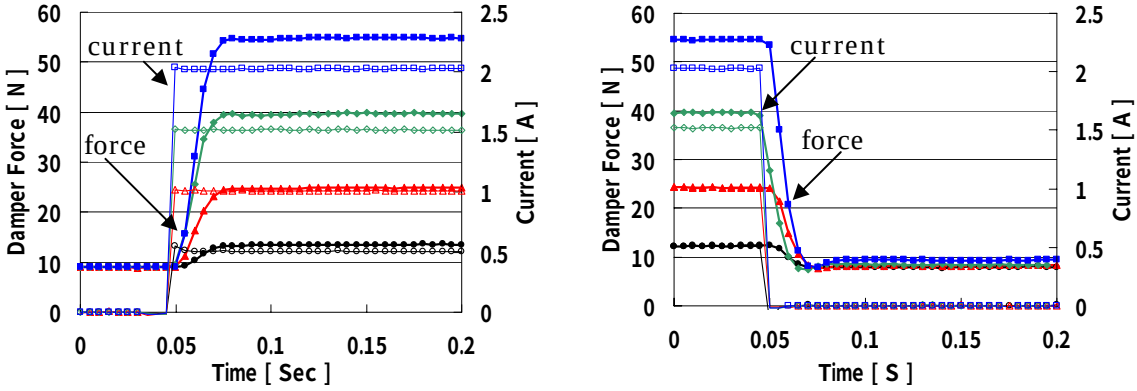
(a)電流立ち上げ時　　(b)電流遮断時

図 2.13 ピストン速度の違いによる荷重変化(振動数 0.1Hz, 振幅 20mm)



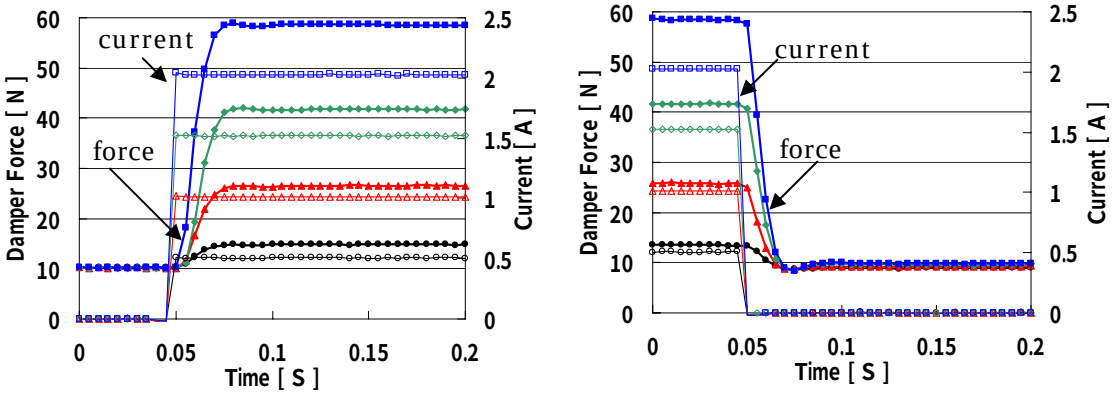
(a)電流立ち上げ時　　(b)電流遮断時

図 2.14 ピストン速度の違いによる荷重変化(振動数 0.2Hz, 振幅 20mm)



(a)電流立ち上げ時　　(b)電流遮断時

図 2.15 ピストン速度の違いによる荷重変化(振動数 0.3Hz, 振幅 20mm)



(a)電流立ち上げ時　　(b)電流遮断時

図 2.16 ピストン速度の違いによる荷重変化(振動数 0.4Hz, 振幅 20mm)

2.4 ダンパーの力学モデル

2.4.1 解析モデルの構築

図 2.11 に挿入されている直線は電流により勾配が異なり、また速度= 0 の点での摩擦抵抗力も電流値に比例はしていない。そこで、ダッシュポット要素および摩擦要素の何れも電流変化に対して非線形であるとし、それらを並列に組み合わせるビンガムモデル(図 2.17)を用い、ダンパーの荷重を(2.1)式で近似することとする。図 2.11 をもとにして、可変粘性係数と可変降伏耐力ともに印加電流の 2 次関数に回帰して図 2.18（a)、図 2.18（c）のように近似した。特に降伏耐力に関しては、やや複雑にはなるが精度を上げるために I=0.8A を境にして係数を変えてある。

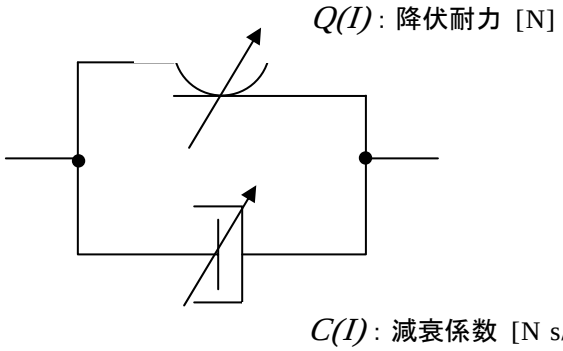
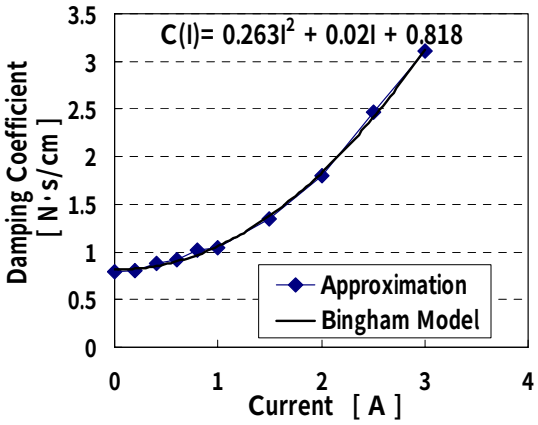


図 2.17　拡張ビンガムモデル

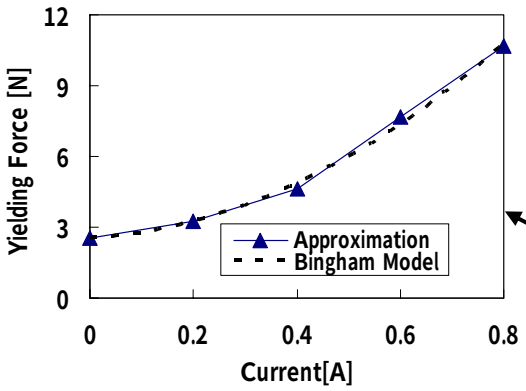
$$F_{MR} = V * C(I) + Q(I) \tag{2.1}$$

ここに、

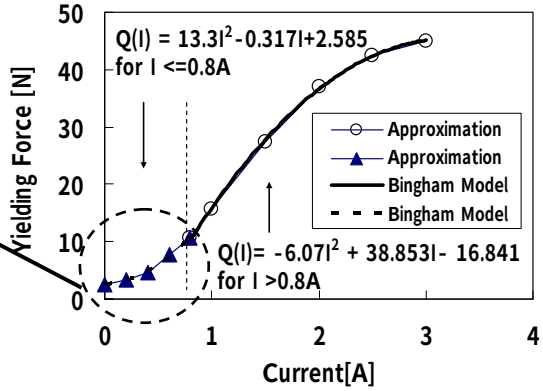
C: 粘性係数（N・s/cm）、Q: 降伏耐力（N）、V: ピストン速度（kine）、I: 印加電流（A）



(a)粘性係数の電流依存性



(b)降伏耐力の電流依存性
（0< I ≤08A）



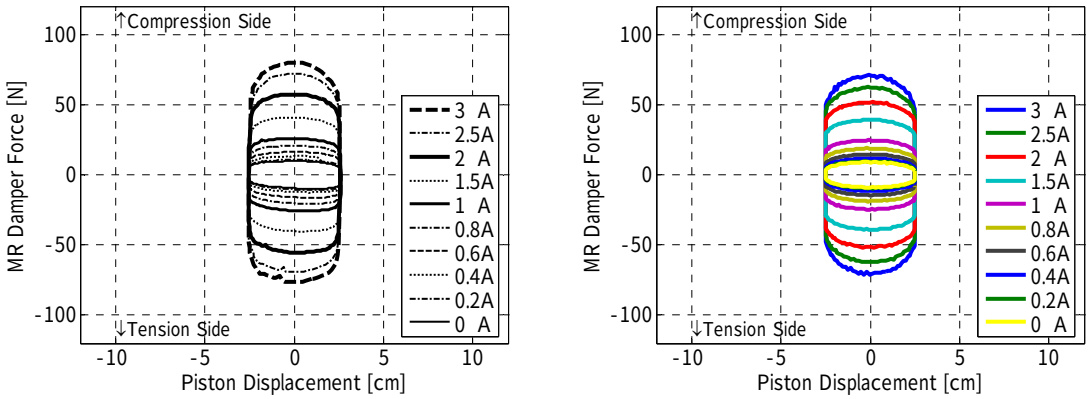
(c)降伏耐力の電流依存性
（0A≤ I ≤3A）

図 2.18　拡張ビンガムモデルによる MR ダンパー荷重の同定

2.4.2 解析モデルの検証

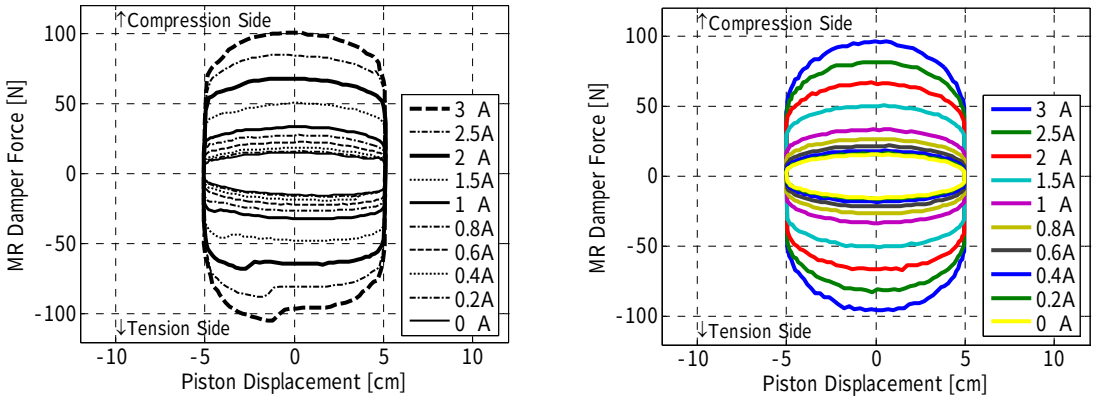
解析モデルに正弦波加振実験と同様な加振条件で変位入力を行い、印加電流を一定としたときの解析モデルによって得られる定常履歴ループを同条件下での実験結果と比較して、本解析モデルの有効性を検証する。正弦波加振における小型 MR ダンパーの解析モデルを用いた解析結果と実験結果の比較を図 2.19-2.20 に示す。概ね解析結果と実験結果に整合性が見られるが、実験で見られる履歴ループの若干の乱れを模擬できていないが、拡張ビンガムモデルで構築したダンパーの減衰力を用いて応答解析を行うには、十分に妥当性があるといえる。

また、2.1 式によりダンパー荷重はそれぞれ速度の 1 次関数と印加電流の 2 次関数となり、後章に示すセミアクティブ制御理論による制御力に与える相当な電流の換算がより簡単に求められるため、簡潔な時々刻々の制御ができると考えられる。



a) 振動数 0.5Hz，振幅 25mm（実験・再掲）　　b) 振動数 0.5Hz，振幅 25mm（解析）

図 2.19　荷重-変形関係（実験値と拡張ビンガムモデルによる解析値との比較）



a) 振動数 0.5Hz，振幅 50mm（実験・再掲）　　b) 振動数 0.5Hz，振幅 50mm（解析）

図 2.20　荷重-変形関係（実験値と拡張ビンガムモデルによる解析値との比較）

2.5 まとめ

本章では、はじめに、設計・開発したバイパス流路を有する小型両ロッド式免震用MRダンパーの構造を示した。次に、ダンパーの力学特性を検証するために、30kNアクチュエータにおいて単体実験を行った。単体実験は正弦波加振実験と電流変化に対するダンパー抵抗力の反応性の三角波加振実験を行った。最後に実験結果に基づき、可変クーロン摩擦要素と可変粘性要素の力学要素により構成されるビンガム解析モデルの構築を検討した。得られた主要な知見を以下に要約する。

1)コイルに一定電流を印加し、正弦波加振によりダンパー荷重は、印加電流とピストン速度が増すともに上がり、ダンパー荷重とピストン変位の関係は常に安定した履歴を描いている。

2)MR ダンパーは電流無印加の場合にはオイルダンパーの力学特性に近いが、ピストンとシリンダー間およびピストンロッドシール部分において若干の摩擦力が生じることの影響を確認した。

3)電流値を 0~3A と変える事によるダンパーの減衰力の可変幅は、ピストン速度が遅い場合に約 0~50N、ピストン速度が早い場合には、10~100N となることを確認した。

4)ピストン速度に依存する電流変化に対するダンパー抵抗力の反応性に関する検証を行った。電流の立ち上げにおいては抵抗力の反応性は印加する電流の可変幅やピストン速度に大きく依存することが確認できた。一方、電流の遮断においては抵抗力の反応性はピストン速度には殆ど依存せず、電流の可変幅だけに影響を受けることが確認できた。

5)拡張ビンガムモデルによる解析結果と実験結果に整合性が見られ、同定・構築したモデルを用いて応答解析を行うには、十分に妥当性がある。

第２章の参考文献

1)荒木伸介、畑克彦、外村卓也、藤谷秀雄、森下信、曽田五月也:同（その29）新規MRFの創製と評価、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、p.239、2001

2)外村卓也、畑克彦：分散安定化磁気粘性流体 （MRF） の開発、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.661-662、2002

3)曽田五月也、茶谷良介：MRダンパーによる5層フレーム試験体のセミアクティブ振動制御に関する研究（その1）小型MRダンパーの力学性能の実験的検証)、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.31-32、2004

4)曽田五月也、茶谷良介：MRダンパーによる5層フレーム試験体のセミアクティブ振動制御に関する研究（その2）振動台実験による制振効果の検証)、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.33-34、2004

5)MR-2 ダンパー取り扱い説明書、(有)シズメテック、2004

6)袖山博、砂子田勝昭、藤谷秀雄、曽田五月也、岩田範生：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究（その14）2kN級、20kN級MRダンパーの開発、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.917-918、2000

7)Lindler J. and Wereley N. M.: Quasi-steady Bingham Plastic Analysis of an Electrorheological Flow Mode Bypass Damper with Piston Bleed, Vol.12, pp.305-317, Smart Materials and Structures, 2003

8)沈里通、曽田五月也、荻野和臣：MR ダンパーによる小型 5 層フレーム試験体のセミアクティブ振動制御に関する研究（その 2）免震制御用小型 MR ダンパーの力学特性に関する実験的検証、日本建築学会学術梗概集、B-2 分冊、pp.883-884，2005

9)Butz T. and Von Stryk O.: Modeling and Simulation of Electro- and Magneto-rheological Fluid Dampers, ZAMM (Z. Angew. Math. Mech.), Vol.82, No.1, pp.3-20, 2002

第 3 章

小型 3 層免震フレームの設計とその動特性

日本国内では、建築構造物に対する可変減衰によるセミアクティブ制御の免震装置が数棟採用された。1.2.2 節の表 1.4 に示したように、2 棟の免震の大学校舎 [1-7] (2000,2005)は可変オイルダンパーが実用化され、1 棟の免震の住宅は MR ダンパーが使用されている [8](2003)。アキュムレーター[9-11] としては積層ゴムまたは鉛プラグ入り積層ゴムを使用している。免震建物はアキュムレーターにより建物の固有周期を 2-3 秒(一般の免震周期)に伸ばして、入力エネルギーを低減し、上部構造の応答加速度を大幅に低減するとともに、何らかの減衰装置を併用して応答変位を抑えるものである。

また、1998 年から 2002 年にかけて、1.2.1 節に示した日米共同スマート大型構造実験プロジェクトを始め、セミアクティブ制御による各種制振・免震用の MR ダンパー（Magnetorheological Fluid damper）を設計・開発し、大型試験体 [12] を用いた振動台実験も行われた。一般に、免震層のダンパーの減衰係数が大きくなると上部構造の応答加速度が増大し、逆に、減衰係数が小さくなると免震層の応答相対変位が増大することになり、建物上部の加速度と免震層の相対変位の間にトレードオフの関係が存在している。 制振効果を確認する最も有効な方法として、繰り返し行う振動台加振実験があるが、前記の実物大の免震実験には、時間や経費が掛かるので、一般的には大量の実験を行うのは困難である。そこで、曽田と茶谷 [13-14]（2003）は、セミアクティブ制振用 MR ダンパー（300N 級、ストローク±2cm）を開発し、小型 5 層鉄骨フレーム（各階は高さ 200mm の柱 4 本と床および錘となる 16kg の鋼板から構成される）を検証の対象建物として 1 階に MR ダンパーを設置して可変せん断力制御によるセミアクティブ振動制御の有効性を検討した。検証している小型試験体を用い、MR ダンパーによるセミアクティブ制御則の妥当性を検証した。

本章では以上の背景を踏まえ、小型 3 層鉄骨フレームを設計・製作し、試験体の動特性を検討する。次に、3.1 節では、上部 3 層鉄骨フレームおよび振動特性実験について記す。3.2 節では、免震装置の開発について述べる。続く 3.3 節では、免震層付き建物モデルおよび振動特性実験について記す。

3.1　上部 3 層鉄骨フレームおよび振動特性実験

写真 3.1 の 3 層鉄骨フレーム各階質量と各階剛性を表 3.1 に示す。試験体は SS400 鋼材を使用した。試験体の固有振動特性を検証するために、基礎を固定した上部 3 層フレームをホワイトノイズ（バンド幅 0~20Hz、最大振幅 0.5mm、継続時間 170sec）により加振し、FDD 法 [19-20]（Frequency Domain Decomposition Method）を用いて固有振動数と減衰定数の評価を行った。1 次モードの固有周期は約 0.27 秒(3.796Hz)、減衰定数は約 1.2%であった。本加振により得られた伝達関数を図 3.1 に示す。

写真 3.1　3 層フレーム

表 3.1　試験体の質量と剛性

階/層	質量 [kg]	剛性 [N/cm]
3	0.568	1710.0
2	0.629	1660.0
1	0.624	1660.0
免震	1.241	18.0

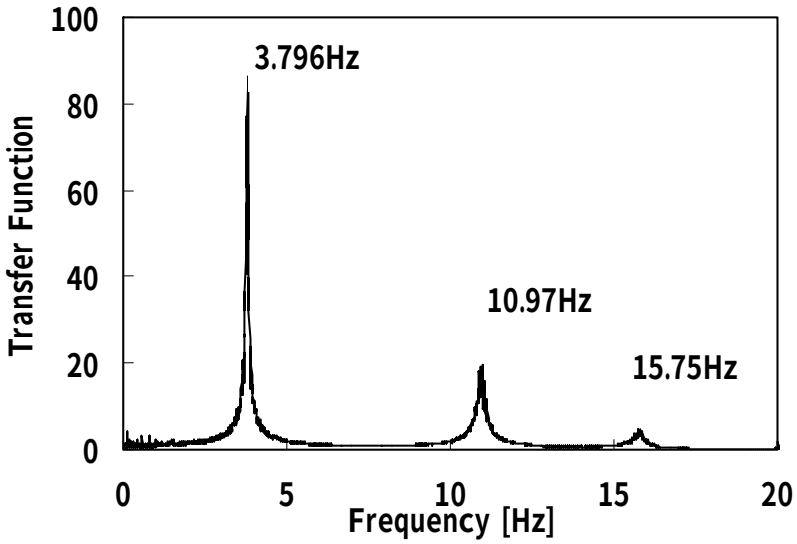
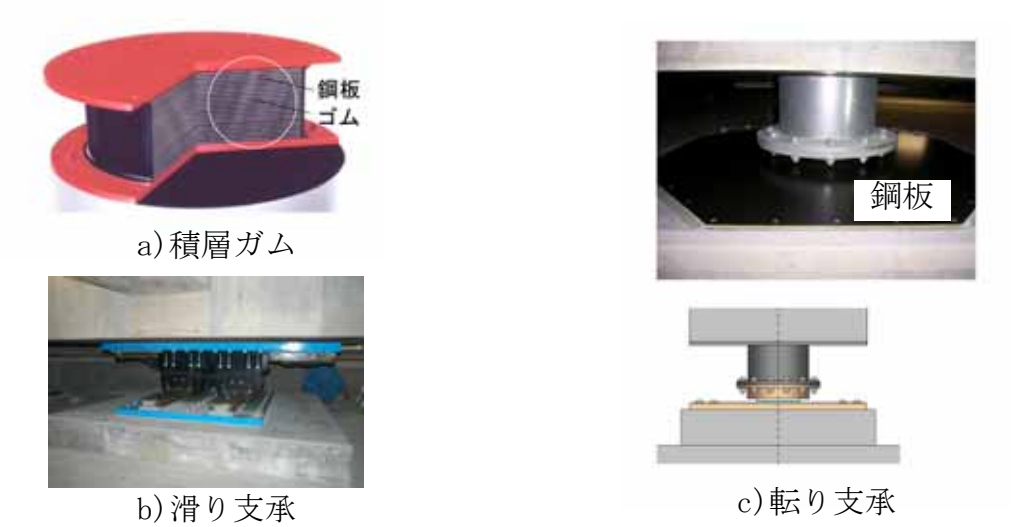


図 3.1　伝達関数（上部固定）

3.2　免震装置

1995 年兵庫県南部地震以後、免震構造が積極的に採用されるようになってきており、特に戸建免震住宅の戸数が増加して、年間約 300 戸程度が建設されている [22-23]。免震層の支承（アキュムレーター）としては、写真 3.2 に示すように、積層ゴム、滑り支承、転がり支承があり、地震の時に建物をゆっくり揺れることができる。積層ゴムは水平剛性が比較的に小さいし、鋼板の硬さにより建物の重さを安定して支えられる。すべり支承は柱の直下に設置してすべり面をテフロンまたはコーティングなど摩擦係数が極力小さくなるように工夫される。転がり支承はボールベアリングを用い、レールを十字型、キ型などで配置することで、建物の揺れを任意方向に移動できるとする。



a)積層ガム　b)滑り支承　c)転り支承

写真 3.2　アキュムレータ [24]

摩擦力を低く抑えるために若干の試行錯誤の結果、免震装置は、写真 3.3 に示すように、L-20×20×3 を利用した V 溝レール（×2 本）上を直径 50.5mm の鋼球（×4 個）が転がる単純な機構とした。その上に厚さ 9mm 鋼板の免震土台（1 階床）を設置した。

写真 3.3　V レールと鋼球による支承

3.3　免震層付き建物モデルおよび振動特性実験

図 3.2 の(a)と(b)に試験体構造図を示す。上部構造の総重量は約 3,000N、逆 V 型に設置した厚さ 4.5mm の鋼板バネの水平剛性は 18N/cm、鋼球が V 型溝を転がる際のクーロン摩擦力は約 2.3N となる。また、ダンパーは、長いストローク(±12cm)を有し、ピストンロッド(φ=10mm)の僅かな曲げ変形による摩擦力の影響を低減させるため、免震床、および基礎部分への取付けには図 3.2(c)に示すようにロッドエンドとなっている。

このように構築される免震フレームのホワイトノイズ波（バンド幅 0~20Hz、最大振幅 90mm、継続時間 170sec）に対する伝達関数は図 3.3 となる。1 次の固有周期は約 2.6 秒（①のピーク）になり、1 次の減衰定数は約 3%である。図中の②~④は、上部構造の振動形に対応するピークであり、その他のピークは水平ばねの振動に起因するものである事を確認してある。

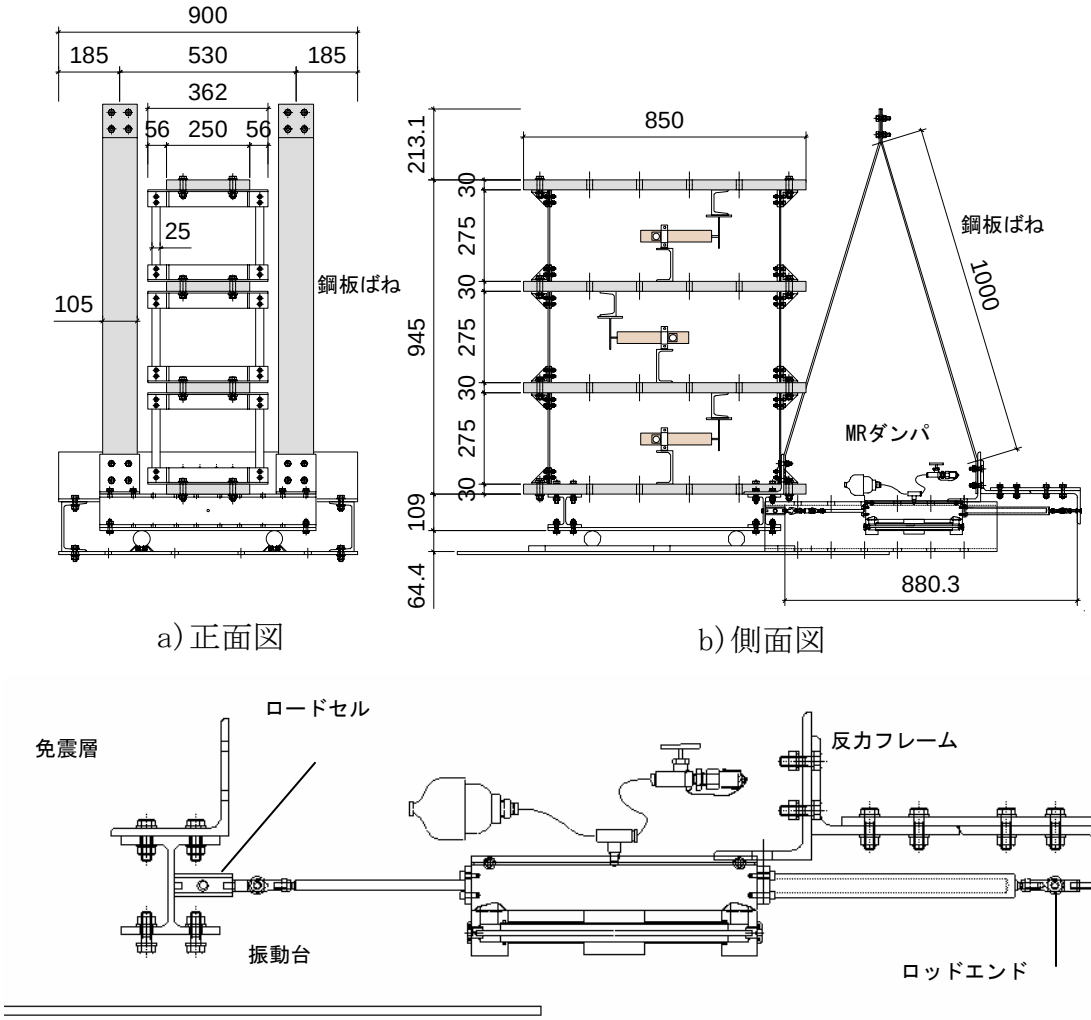


図 3.2　3 層鉄骨免震フレームの構造図（単位:mm）

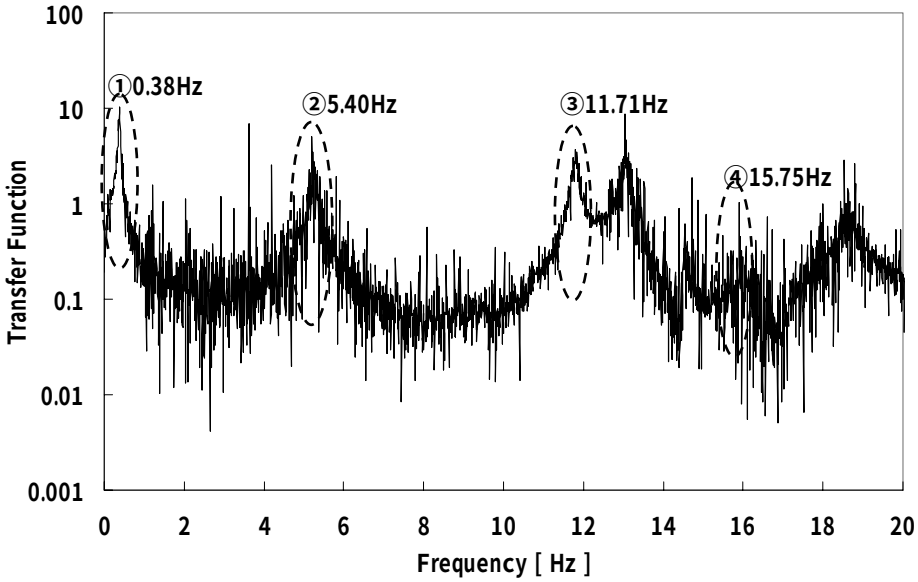


図 3.3　伝達関数(免震建物)

3.4 まとめ

本章では、免震装置を示し、免震試験体の基本的な動特性を把握した。はじめに、試験体の固有振動特性を検証するために、基礎を固定した上部 3 層フレームをホワイトノイズにより加振し、FDD 法を用いて固有振動数と減衰定数の評価を行った。上部構造の 1 次モードの固有周期は約 0.27 秒、減衰定数は約 1.2%であることを確認した。

次に、V 溝レール上を直径 50.5mm の鋼球が転がる単純な機構を設計した。免震システムは鋼球による転がり支承、V 溝レール、鋼板ばねで構成されている。また、鋼板ばねは復元機能を有する。通常の免震建物は復元用に積層ゴムが用いられるが、小型建物に対する安定した大変形性能を有するように、鋼球と V 溝レールを併用する転がり支承としている。

最後に、逆 V 型に設置した厚さ 4.5mm の鋼板バネを復元力として用い、免震層付き建物を構成する。免震モデルでは免震層のみに、MR ダンパーを設置しており、ホワイトノイズにより加振し、FDD 法を用いて固有振動数と減衰定数の評価を行った。1 次の固有周期は 2.6 秒であることが確認できた。また、復元力を有する鋼板ばねが用いられ、免震建物の短周期成分と鋼板ばねの短周期成分が混在しており、それぞれの固有振動数が確認された。

これらの動的加振実験と振動特性の同定方法により、免震試験体の固有振動数と減衰定数を確認した。

第 3 章の参考文献

1) 吉田和夫: 世界初のセミアクティブ免震ビル、日本機械学会誌、 Vol.104、No.995、pp.48-52、2001

2)篠崎洋三、藤山淳司、長島一郎、欄木龍大、北川良和、吉田和夫：可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用（その 1）適用建物と設計概要、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.723-724、2005

3)小松宏康、讃井洋一、篠崎洋三、長島一郎、北川良和、吉田和夫：可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用（その 2）可変減衰ダンパーの基本性能、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.725-726、2005

4)藤山淳司、篠崎洋三、佐伯正尚、長島一郎、欄木龍大、北川良和、吉田和夫：
可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用（その 3）振動解析モデルと地震応答解析、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.727-728、2005

5)長島一郎、欄木龍大、篠崎洋三、藤山淳司、北川良和、吉田和夫：可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用（その 4）制御設計手法と基本性能、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.729-730 、2005

6)欄木龍大、長島一郎、篠崎洋三、藤山淳司、北川良和、吉田和夫：可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用（その 5）振動台による検証実験、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.729-730 、2005

7)萱嶋誠、篠崎洋三、長島一郎、欄木龍大、北川良和、吉田和夫、小林隆英：可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用 (その 6) 安全監視システム、B-2 分冊、p.733-734、2005

8)Sodeyama, H., Suzuki, K. and Sunakoda, K. : Development of Large Capacity Semi-active Seismic Damper using Magneto-Rheological Fluid, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol.126, No.1, pp.105-109，2004

9)日本免震協会：免震構造入門、pp.59-114、オーム社、1995

10）川島一彦、北川良和：訳（著者： Skinner R.I., Robison W.H. and Mcverry G. H. ）：免震設計入門、pp.191-266、鹿島出版社、1996

11）鹿島都市防災研究会：制震・免震技術、pp.63-165、鹿島出版会、1996

12）藤谷秀雄、飯場正紀、勅使川原正臣、緑川光正、小豆畑達哉、森田高市、塩崎洋一、樋渡健、福田顕議、箕輪親宏：高知能建築構造システムの開発に関する日米共同構造実験研究（その 51）大型実験の概要と試験体の特性、B-2 分冊、p.925-926、2002

13）曽田五月也、茶谷良介：MR ダンパーによる小型 5 層鋼製フレーム試験体のセミアクティブ振動制御に関する研究（その 1）小型 MR ダンパーの力学性能の実験的検証、B-2 分冊、p.31-32 、2004

14）茶谷良介、曽田五月也：MR ダンパーによる小型 5 層鋼製フレーム試験体のセミアクテ

ィブ振動制御に関する研究(その 2)振動台実験による制振効果の検証、B-2 分冊、p.33-34、2004

15）日本建築学会：建物の減衰、pp.65-125、2000

16）Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P.：Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proc. of the 19th IMAC, pp.625-630, 2001

17）塚田茂晴、曽田五月也、高橋治：オイルダンパーを用いた実制振建築物の FDD 法による減衰特性評価、B-2 分冊、p.997-998、2004

18）緑川光正、飯場正紀：住宅用免震部材の地震応答振動台実験、No.18、pp.35-40、日本建築学会技術報告集、2003

19）飯場正紀 : 戸建住宅における免震技術、pp.70-76、第 12 回日本地震工学シンポジウム、2006

20）日本免震協会(JSSI) : 免震装置について、http://www.jssi.or.j/gaiyou/shoshin/sho-0.htm、2006

第 4 章

セミアクティブ制御アルゴリズム

1995 年の阪神大震災の調査報告によると、窒息・圧死による死亡率が 77%であり、家具・設備などの転倒・倒壊・破損による死亡数も多かったと報告されている [1)]。建物の耐震性を高めるため、免震構造物やパッシブ制振構造物が普及している。しかし、パッシブ制御による最適制振効果 [2-3)]がある範囲内で限られており、予想外の地震動の卓越周期またはレベルが発生すると、過大な応答加速度や応答変位が生じる恐れがあると考えられる。

著者らは、免震層に設置した MR ダンパーのセミアクティブ制御の有効性や妥当性などを検討するため、1 層免震建物モデル [4)]および前章に述べた最下層に免震構造を有する 3 層鉄骨造フレームによる振動台実験 [5)]を通じて、セミアクティブ振動制御による振動台実験を行い、LQR 制御則や EF 制御則によるセミアクティブ制御を行った。振動台による加振は、MR ダンパーの許容ストローク範囲内(±120mm)に収まるように、地震動入力の大きさを調整して実施した。また、印加電流(磁界)による MR ダンパーの抵抗力の同定は、2.5 節に示す拡張ビンガムモデルが使用した。実験の結果により、小型 MR ダンパーによっても大型のダンパーによる場合と同様に、セミアクティブ制御の効果を振動台実験により検証できることが分かった。

本章では、前記に記す小型試験体によるセミアクティブ制御実験の背景を踏まえ、後章において振動台実験を実施する各パッシブ制御とセミアクティブ制御のアルゴリズムを示す。4.1 節では、MR ダンパーによる定電流制御と MR ダンパーによるオイルダンパーを模擬した速度比例減衰制御の方法を記す。4.2 節では、先ず初めに、ファジィ理論の仕組みやファジィルール、ファジィ推論を示し、2 次元のファジィルールによる制御力の構築方法を記す。次に、セミアクティブ制御によく用いられている LQR 制御、およびスカイフック制御を示し、制御力によって時々刻々MR ダンパーに与える抵抗力の調整方法を記す。最後に、免震層の相対速度の予測方法を示し、予測した速度により免震構造物に減衰力を付加する制御方法の提案を記す。なお、検討の対象物は 3.3 節に示した小型免震建物である。解析では 6.2.1 項に記した 4 質点系モデルを用いて、免震層の変位と最上階の絶対加速度を同時に抑えることを目標にして最適な制御パラメータを策定した。

4.1　MR ダンパーのパッシブ使用制御

4.1.1 定電流制御

MR 流体のせん断応力とせん断速度の関係を図 4.1 に示す。せん断応力とせん断速度の関係において、せん断応力は印加電流とせん断速度の増加につれ、線形の関係を有するため、降伏応力の変化がせん断速度に若干依存しており、ほぼ印加電流に依存していることが明らかになっ Shear Stress[kPa] ストンロッド(φ=10mm)には僅かな曲げ変形摩擦力の影響が見られ、印加電流が高いほど、より降伏荷重の増大の幅が顕著になることが確認できた。MR230 流体の力学特性は、2 章で示した小型 MR ダンパーの単体実験の結果と対応しており、図 4.2 に示すように、電流(磁界)印加された MR 流体は、降伏応力を有し、ビンガム流体という力学特性を有することを確認した。

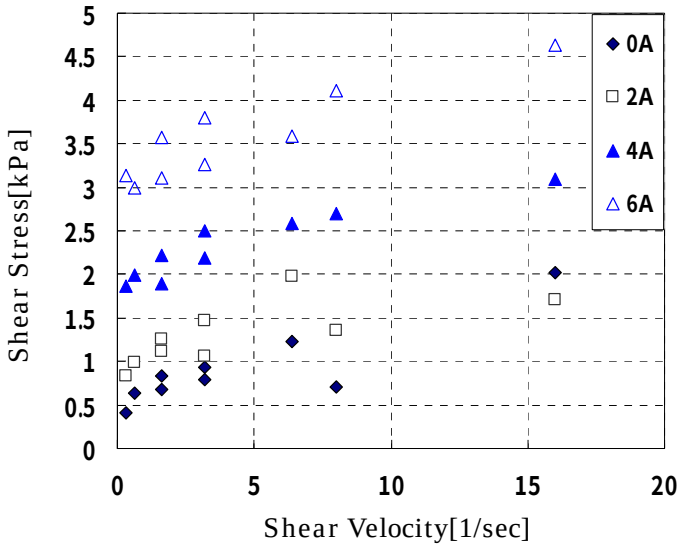


図 4.1　MR230 流体のせん断応力-せん断速度の関係 [6)]

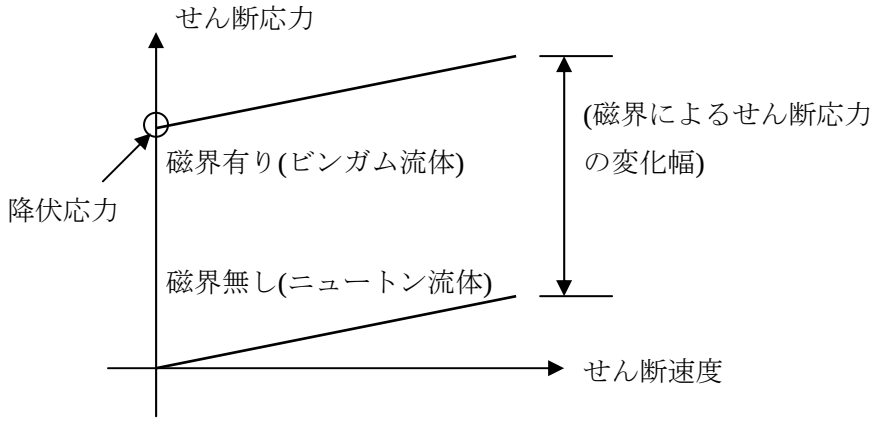


図 4.2 磁界による MR 流体の挙動

後章の振動台実験の定電流制御では、MR ダンパーに印加する定電流を 0A から 3A まで 0.5A ごとに作用させ、印加電流（減衰係数）の増加により応答変位と応答加速度の変化の影響を検証することである。

4.1.2 速度比例制御

MR ダンパーを用いて速度比例型オイルダンパーの力学特性を模擬する。ダンパーの抵抗力は建物モデルを 1 質点系(SDOF)の剛性比例減衰系としてその減衰定数が 10%, 20%, 30%, 40%に対応するように決める。また、粘性オイルダンパーは速度に依存するため、後章の振動台実験は免震層の速度の変化によって印加電流を調整することとなり、粘性系の減衰変化に対する応答の影響と前項の摩擦系の減衰変化に対する応答の影響との比較を目指している。

4.2 セミアクティブ制御則

一般的な免震建物が地震力を受ける時の免震層の応答は、上部構造を剛体と見なした場合の応答と大差ない。実際に本構造モデルでも上部を剛体とした 1 質点モデルの周期と、図 3.2 に見られる多質点系の固有周期は何れも約 2.6 秒であり両モデルの免震基礎の動きはほぼ同等と考えることが出来る。従って、制御実験を行う時は、MR ダンパーの制御力は免震モデルを SDOF として算出することとした。非制御の場合に免震層の最大変形が 12cm に収まるように基準化した入力に対してセミアクティブ制御効果が最も高くなるように制御パラメータの値を決めた。ここで、ある地震動に対する制御パラメータの最適値は、各セミアクティブ制御時と非制御(電流ゼロ)時の、免震層の最大相対変位の比と、最上階の最大絶対加速度の比の 2 乗和平方根が最小となる値~~(最適判断値)~~と定義する。さらに、各地震動について決定したその値の平均値を最小とする時のパラメータ(最適判断値)を最適パラメータとする。以下に実験で用いた種々の制御則の概要を記す。

4.2.1　ファジィ制御（以下、FC 制御）

本節では、ファジィ制御の構造と演算について述べる。ファジィ制御は電車の自動運転制御、給湯温度制御、家電製品などに適用されて来ており [7-8]、近年ではファジィ理論を建築物の地震応答制御にも適用している [9-10]。ファジィ制御を建築構造物の制振に適用する際には、制御対象の正確なモデル情報を必要としない一方、最適制御などのセミアクティブ制御則は制御対象の正確なモデルを必要とする。しかしながら、制御パラメータの最適設定にあたり試行錯誤を繰り返す必要があり、ファジィ領域値の前件部変数と後件部変数の大きさに応じて適正な値を設定しなければならない。

ファジィ制御は、図 4.3 に示すような演算過程で実施される。まず、曖昧な言語変数を用いた制御ルールを複数の If x（前件部） then y（後件部）形式で表現する。次に、入力

情報が与えられた場合、これがルールとどの程度適合するかを曖昧な出力情報として評価する。最後に、出力情報を非ファジィ化して確定的な制御コマンドとする。曖昧な言語変数や曖昧な出力情報等は、コンピュータにより処理させるために、通常の集合で用いられる特性関数を一般化したメンバーシップ関数により表現する。

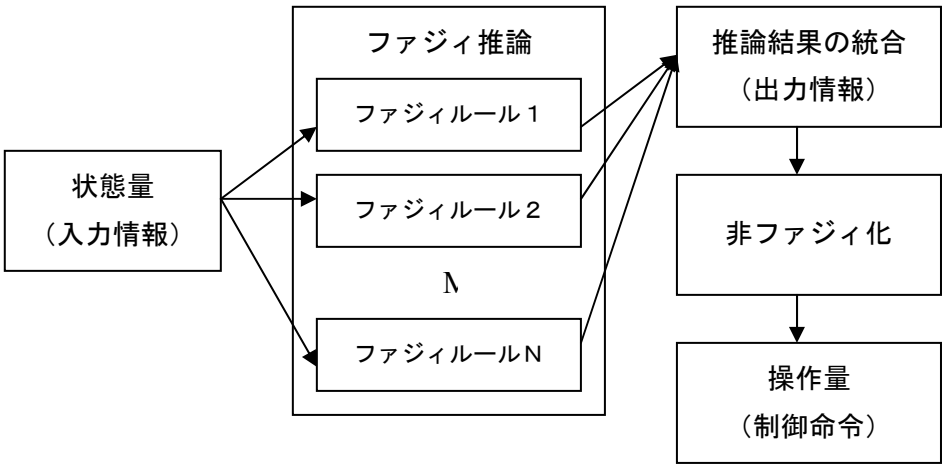


図 4.3 ファジィ推論の演算過程

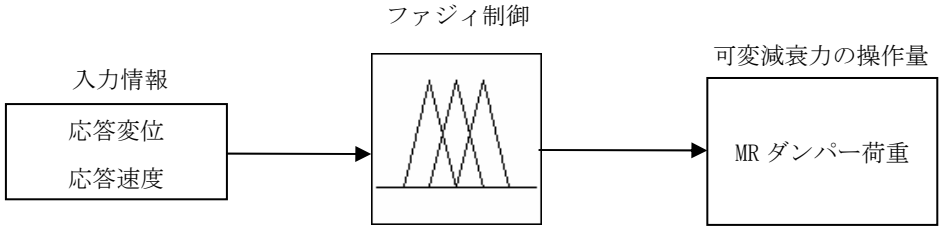


図 4.4 応答変位･応答速度によるファジィ制御

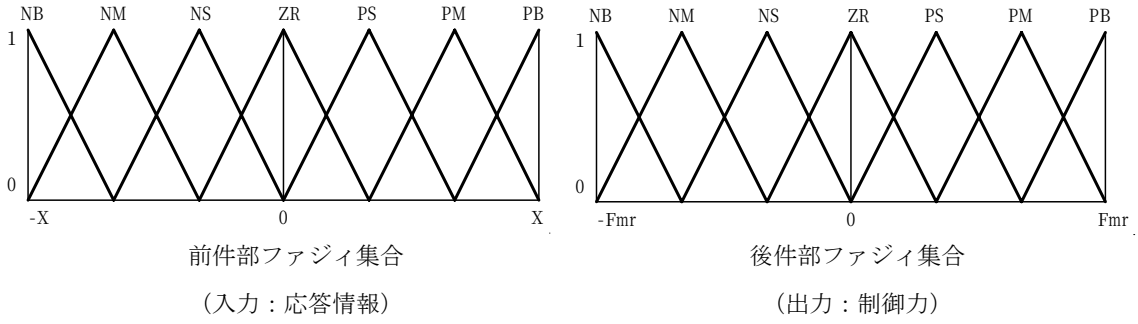


図 4.5　三角形メンバーシップ関数

ファジィ制御は、

1)曖昧な入力情報を表現（ファジィ化）するためのメンバーシップ関数

2)曖昧なままでシステムを制御するための制御ルール

3)曖昧な形の出力情報を与えるファジィ推論部
4)曖昧な出力情報を確定量にするための確定方法（非ファジィ化）
の 4 つの部分に分けられる。

著者が解析によりファジィロジックの 2 次元推論による MR ダンパーのセミアクティブ制御の有効性を確認した結果を応用する[11)]。後章のファジィ制御による振動台実験では、表 4.1 に示すように、2 次元の制御規則は、前件部を免震層相対変位（±20cm）と相対速度（±60kine）として、後件部の制御力（±100N）を決めることである。また、応答変位や応答速度、制御力の規則は、ゼロを中心にした正負 3 段階のファジィ集合を用い、NB（負で、大きい値）、NM（負で、中ぐらいの値）、NS（負で、小さい値）、ZR（ゼロ）、PS（正で、小さい値）、PM（正で、中ぐらいの値）、PB（正で、大きい値）と定義している。免震層の応答変位が大きい時には、応答変位フィードバック制御を行い、応答変位が小さい時には、応答速度フィードバック制御を行って、応答速度がゼロの時は制御力をゼロにすることとする。図 4.6 に応答情報（前件部）に対するフィードバック制御力（後件部）曲面を示す。

表 4.1　次元ファジィ制御ルール

後件部：制御力		前件部2：免震層相対速度						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
前件部1：免震層相対変位	NB	PB	PB	PB	ZR	PB	PB	PB
	NM	PM	PM	PM	ZR	PM	PM	PM
	NS	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
	ZR	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
	PS	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
	PM	NM	NM	NM	ZR	NM	NM	NM
	PB	NB	NB	NB	ZR	NB	NB	NB

ZR：Zero　NB：Nagtive Big　NM：Nagtive Middle　NS：Nagtive Small　PB：Positive Big　PM：Positive Middle　PS：Positive Small

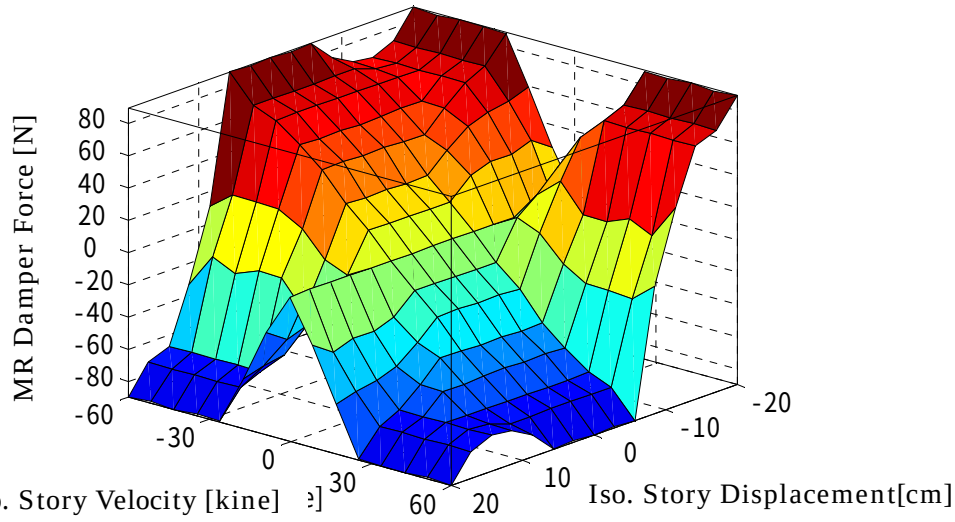


図 4.6　ファジィ制御力

4.2.2 スカイフック制御（以下、SH 制御）

スカイフック制御 7)では、文献 12 の手法により式(4.1)に示すような印加電流と免震層相対速度を制御条件とし、後に 4.2.5 項に例示する予備解析により最適な境界値を決める。ダンパーへの印加電流は式(4.1)となり、A1 と A2 は印加電流[A]の境界値、V1 と V2 は免震層相対速度[kine]の境界値である。なお、式(4.2)に示すように、免震層の相対速度と絶対速度の符号が逆の場合には、電流を印加しない、x_g は基礎の絶対変位、$\dot{x}_o$は免震層の相対変位。

$$I_{SH} = \begin{cases} \mathrm{A}_2 & |\dot{x}_o| > \mathrm{V}_2 \\ \mathrm{A}_1 & \text{for} \quad \mathrm{V}_1 \le |\dot{x}_o| \le \mathrm{V}_2 \\ 0 & |\dot{x}_o| < \mathrm{V}_1 \end{cases} \tag{4.1}$$

$$I = \begin{cases} I_{SH} & (\dot{x}_o)(\dot{x}_g + \dot{x}_o) \ge 0 \\ 0 & (\dot{x}_o)(\dot{x}_g + \dot{x}_o) < 0 \end{cases} \tag{4.2}$$

4.2.3　最適レギュレータ制御（以下 LQR 制御）

最適レギュレータ制御 [15-18](Linear Quadratic Regurator)の目標は応答と制御力の大きさをバランス良くすることであり、式(4.3)の評価関数(Criterion function)を最小化する事を基本とする。

$$J = \int_0^\infty \left[\mathbf{x}^{\mathbf{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x} + Ru^2\right]dt \tag{4.3}$$

ここに、**x**, u は建物の応答と制御力であり、**Q** と R は重み関数である。ダンパーの制御力は式(4.4)になる。

$$F_{MR} = -R^{-1}\mathbf{b}^{\mathbf{T}}\mathbf{P} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \tag{4.4}$$

ここで、**P** は 2×2 のマトリクスであり、式(4.5)のリッカティ方程式(Riccati Equation)を満たす正定唯一解であり、**b** は SDOF としての入力マトリクスである。**K**(1×2)を最適フィードバックゲインと呼ぶ。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{b}R^{-1}\mathbf{b}^{\mathbf{T}}\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \tag{4.5}$$

一連の試行錯誤的予備解析により、変位を抑えつつ加速度を抑制するのに最も適したパラメータは、4.3.5 に示す方法に準じている。後章の振動台制御実験の LQR 制御実験では、重み関数が **Q**=diag.([100 100]), R=5 を用い、フィードバックゲインは **K=diag([**-1.5078 -4.7474]) とした。

4.2.4　応答予測制御則（以下、FF 制御）

後に 5.3.2 節に記す通り、通常の粘性減衰を付加することも、減衰係数の決め方によっては十分に効果的である。そこで、免震層の速度に応じて減衰係数（減衰定数）を可変とする制御則を用いることとした。この時に変位のピーク時に、原点を追過する際の速度を予め予測するようにした。

図 4.7 に例を示すように、SDOF に変換した上記の免震構造モデルの地震応答解析により得られる図 4.8 の変形の時刻歴を基にして、応答変位が原点を横切る時の運動エネルギーとそれに対応する変位のピークにおける歪エネルギーの関係を図 4.7 に示す。これより、応答レベルの高い領域では、減衰の大小によらず、位置エネルギーと運動エネルギーは、互いに 1 対 1 の関係として近似できることがわかった。この関係を利用して応答予測を交えた制御則を下記の通りに考えた。

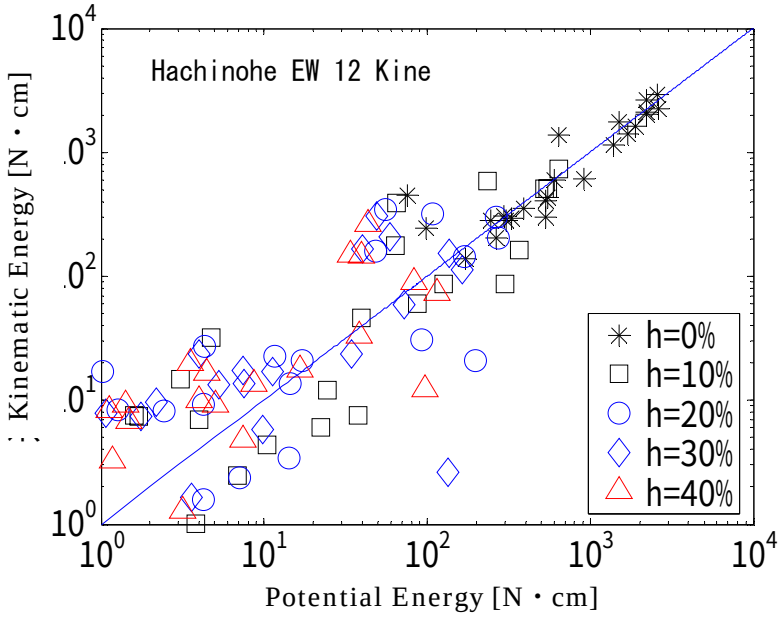


図 4.7　SDOF による振動エネルギーの関係

免震層の剛性を k_o、免震建物全体の質量を m とする。免震層の応答速度を予測するの場合には、図 4.8 に示すように時々刻々に免震層の応答をモニターし、各半サイクル毎に、免震層のピーク変位（速度がゼロである：②と④）の位置エネルギーおよび運動エネルギーの関係を用い、ピーク速度（⑤）を予測することが出来る。これを利用して、

後章の振動台実験の本制御アルゴリズムでは制御力を、

$$F_{MR}=2h_iV(t)(k_o\,m)^{1/2} \tag{4.6}$$

とする。ここに、半サイクルごとに変化する減衰定数は下式とする。

$$h_i=0.2+\alpha\,|V_i| \leqq 0.4 \tag{4.7}$$

ここに、$\alpha=0.01$(s/cm)である。

本制御アルゴリズムでは、減衰定数 *hi* を速度の速度値に比例させて半サイクルごとに変化させることにする。減衰定数の最小値は 20%、最大値は 40%とする。

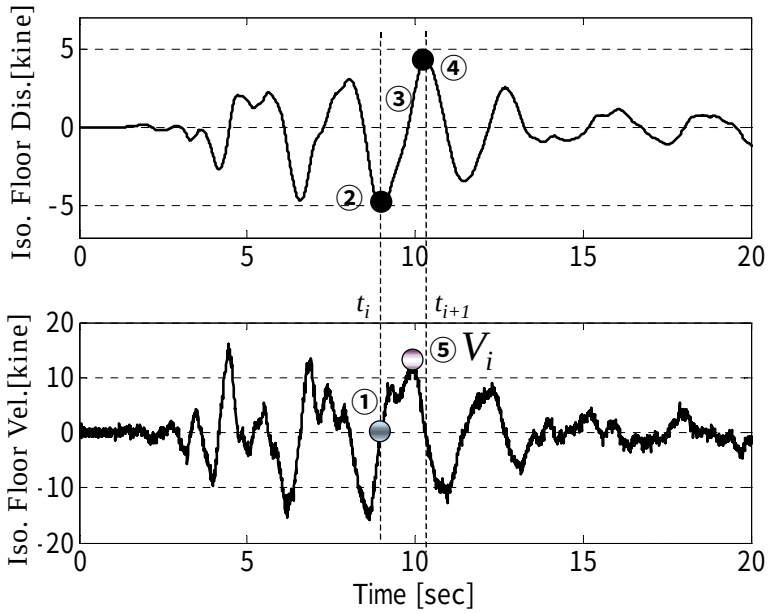


図 4.8　振動エネルギーによる応答速度の予測

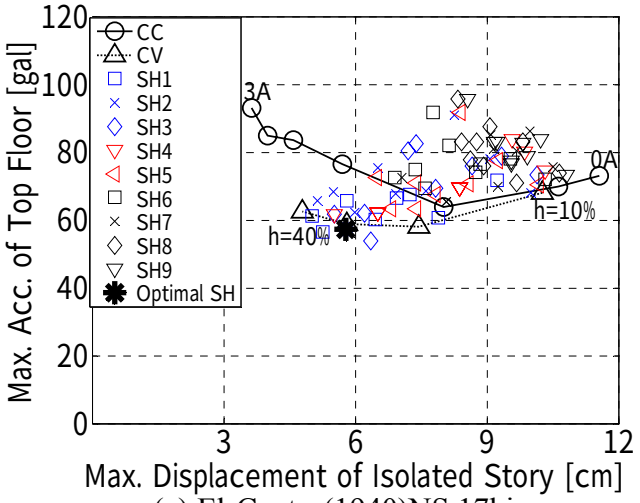
4.2.5　最適パラメータの策定例

本研究ではセミアクティブ制御のための最適パラメータを事前解析により探索している。SH制御の場合の探索例を図4.9に示す。表4.2は式(4.1)により設定した免震層相対速度の境界値と、免震層相対速度の境界値に対する種々の印加電流であり、それらを組み併せて得られた最適性評価値を最右列に記してある。図中の※印が最適なSH制御パラメータに対応している。各セミアクティブ制御について、このように定めたパラメータ値を用いて行った実験結果を5章では相互に比較している。なお、事前解析で使用する外乱は振動台上で事前に記録した波形である。

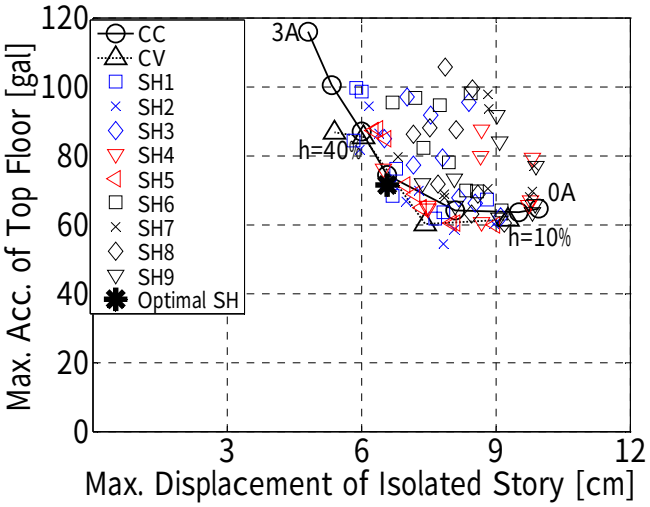
表 4.2　SH 制御のパラメータの設定

	免震層相対速度の境界[kine]		免震層相対速度の境界に対する印加電流[A]		最適判断値
	V_1	V_2	A_1	A_2	
SH1	5	10	0.5	1	1.0083
SH2	5	15	1	1.5	1.0451
SH3	5	20	1.5	2	1.0522
SH4	5	25	2	2.5	1.0377
SH5	10	15	0.5	1.5	1.1174
SH6	10	20	1	2	1.2027
SH7	10	25	1.5	2.5	1.1416
SH8	15	20	0.5	2	1.267
SH9	15	25	1	2.5	1.2876

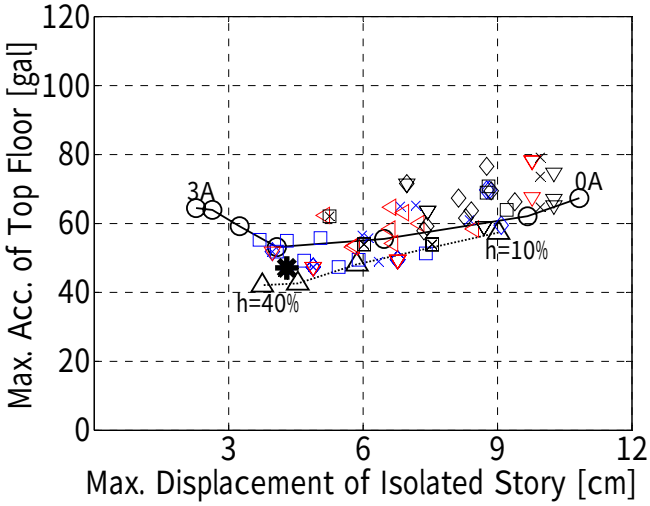
※ SH：V_1=5kine, V_2=10kine；A_1=1.5A, A_2=2Aを最適とする



(a) El-Centro(1940)NS 17kine



(b) Kobe(1995)NS 26kine



(c) Hachinohe(1968)EW

図 4.9　事前解析による最適な SH 制御パラメータの策定

4.3 まとめ

本章では、MR ダンパーのパッシブ使用制御とセミアクティブ制御則について記す。先ず始めに、MR ダンパーのパッシブ使用制御は、振動台実験において CC 制御のパラメータ、およびオイルダンパーの減衰定数を模擬する CV 制御の方法とパラメータを示した。非制御の場合に免震層の最大変形が 12cm に収まるように基準化した入力に対してセミアクティブ制御効果が最も高くなるように制御パラメータの値を決めた。次に、以下の 4 種類のセミアクティブ制御アルゴリズムについて記す。

1)FC 制御の構築：ファジィロジックの 2 次元推論による MR ダンパーのセミアクティブ制御力の求め方が構築された。

2)LQR 制御の適用：速度と変位の定常フィードバックを行い、重み関数を設定して 2 次形式の評価関数を最小化することにより、最適制御力を求める方法が示された。

3)SH 制御の適用：免震層の相対変位の応答を数段階に分けて、相対変位の大きさに応じて、MR ダンパーへの印加電流を数パターンが設定された。

4)FF 制御の提案：半サイクルごとに原点に通過時の最大速度を予測し、予測された応答速度に応じて減衰係数を時々刻々 MR ダンパーに変化させる方法が提案された。

第 4 章の参考文献

1)阪神･淡路大震災災害調査報告編集委員会：阪神･淡路大震災調査報告、共通編-1（総集編）、日本建築学会、pp.59-62、2000

2)山口宏樹：構造振動･制御、pp.109-149、共立出版、1996

3)背戸一登：構造物の振動制御、pp.25-92、コロナ、2006

4)荻野和臣、曽田五月也、沈里通：小型 MR ダンパーによるセミアクティブ免震制御、日本地震工学会大会梗概集、PP.172-173、2005

5)沈里通、曽田五月也、内藤雄介、荻野和臣：MR ダンパーによる小型 3 層免震フレームのセミアクティブ振動制御に関する研究、第 30 回地震工学･応用地学に関するシンポジウム、pp.27-28、2006

6)外村卓也、畑克彦：分散安定化磁気粘性流体（MRF）の開発、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.661-662、2002

7)宮崎誠一、宮崎仁：パソコンで学ぶ自動制御の応用学 ～ モータ制御からｱﾄﾞﾊﾞﾝｽﾄ制御までを実験する～、pp.201-205、 CQ 出版、1992

8)田中一男：ｱﾄﾞﾊﾞﾝｽﾄﾌｧｼﾞｨ制御～ファジィ制御の新たなる展開～、pp.8-49 共立出版、 1994

9)山田登志郎、鈴木宏一、小林創：ﾌｧｼﾞｨ理論による建築構造物の非線形履歴応答制御（その I:ﾌｧｼﾞｨ理論の建築構造物の地震応答制御への適用性に関する研究）、日本建築学会構造系論文報告集、Vol.466、pp.59-68、1994

10) Lin, P. Y., Roschke P. N. and Loh, C. H.：Hybrid base-isolation with magnetorheological damper and fuzzy control, Struc. Control Health Monit. (in press) 2006.

11)沈里通、曽田五月也、内藤雄介、荻野和臣：MR ダンパーを設置した小型3層免震フレームのファジィ推論に基づくセミアクティブ振動制御解析、第 12 回地震工学シンポジウム論文集、pp.1034-1037、 2006

12)藤谷秀雄、樋渡健、塩崎洋一、曽田五月也：MR ダンパーによる免震構造のスカイフック制御実験、日本建築学会構造工学論文集、Vol.49B, pp.105-110, 2003

13) Hiemenz G. J., Choi Y. T. and Wereley N. M.: Seismic control of Civil Structures Utilizing Semi-active MR Braces, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.18, pp.31-44, 2003

14) Franklin, G.F., Powell, J.D. and Emami-Naeini, A.: Feedback control of Dynamic Systems, pp.492-645, Prentice Hall, 2002

15) Ogata K.: Modern Control Engineering, pp.837-846, Prentice-Hall, 1990

16) 吉川恒夫、井村順一：現代制御論、pp.105-164、昭晃堂、1994

17) 山口宏樹：構造振動・制御、pp.150-190、共立出版、1996

18) 樋渡　健、塩崎洋一、藤谷秀雄、曽田五月也：最適レギュレータ理論を用いた MR ダンパーによるセミアクティブ免震、日本建築学会論文集、pp.47-54、2005

第 5 章

小型 3 層免震フレームの振動台実験

本振動台実験では、小型 3 層免震試験体を制御対象として、免震層の情報（応答変位、応答速度）のみ、セミアクティブ制御実験を行う。前章に記した FC 制御と FF 制御の応答低減の有効性を確認するために、MR ダンパーによるパッシブ制御、LQR 制御、SH 制御との比較を検討する。

MR 流体の沈殿の安定性、および荷重の反応時間の遅れにつては、制御効果に大きい影響を与えるため、セミアクティブ制御を行う際が重要な注意点である。第 2 章に示したように、開発した小型 MR ダンパーは MR230 型 MR 流体を用い、振動数、振幅、印加電流をパラメータとするダンパーの荷重変形の実験結果により、履歴の再現性が高く流体の沈殿の影響が比較的小さいと考えられる。また、印加電流に対するダンパー荷重の反応時間の実験結果により、約 20-50ms となるため、2.6 秒の免震建物に対し、荷重反応の遅れ時間の影響は比較的小さいと考えられる。

本章では、小型免震試験体において、免震層の変位と上部構造最上階の絶対加速度の両応答を抑制することを目的とし、振動台実験の実験装置や MR ダンパーを用いて免震建物の制御方法および、前章に示した各パッシブ制御（CC 制御、CV 制御）と各セミアクティブ制御のアルゴリズム（FC 制御、LQR 制御、SH 制御、FF 制御）により、実験結果と考察を記す。5.1 節では、振動台や計測システム、制御システム、入力外乱について記す。5.2 節では、振動台実験の結果、および免震建物において各階の最大応答変位と最大応答加速度、MR ダンパーの荷重変形関係、速度予測制御、免震建物の応答変位と応答速度のトレードオフ関係などの考察について記す。

5.1　振動台実験システム

5.1.1　振動台

本実験では早稲田大学喜久井町キャンパス第2研究棟に設置された1,000kN動的アクチュエータの先端に直動ベアリングで支持された梁を取り付け、その上に 900×1400×9mm の鋼板を取り付けて振動台(写真 5.1)とした。後に図 5.3、5.4 で見る通り、必ずしも目標とす

る原波形を正確には模擬できないが、実験の繰り返しに対する再現性の高いことは確認してある。

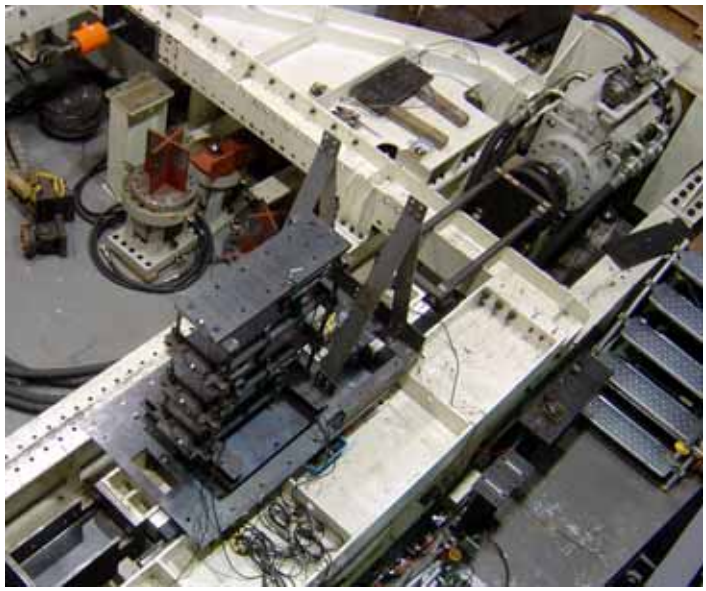


写真 5.1　振動台とアクチュエータ

5.1.2　計測システム

各計測装置の設置状況を図 5.1 に示す。試験体の各床面に加速度計(ARF- 10A および ARF-20A)、層間に接触式変位計(DLT-20AS)、加力梁のヘッドに接触型変位計(SDP-200D)、免震層にロードセル(TKA-50A)を設置した。免震層の変位測定には接触式変位計(DLT-150AS)を用いた。また、MR ダンパーへの印加電流を計測するため、1Ω の抵抗をダンパーのコイルに直列結合してある。

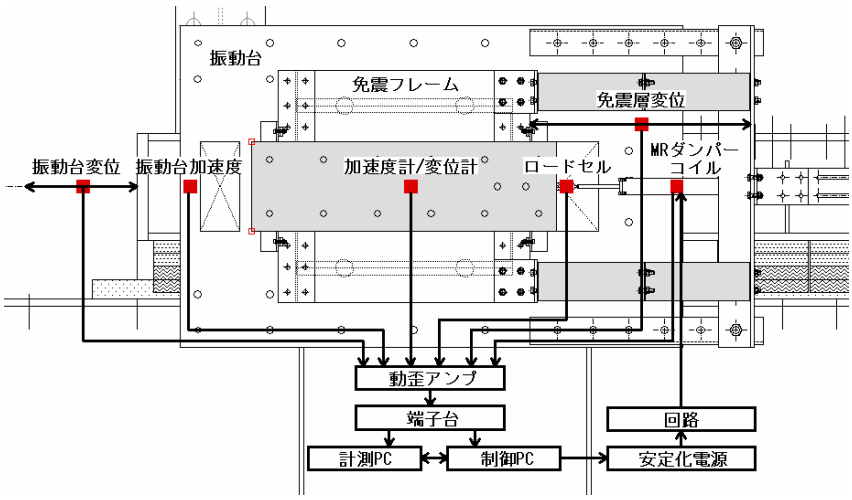


図 5.1　計測と制御装置の配置

5.1.3　制御システム

制御 PC には MATLAB/Simulink[1-3]及び高速デジタル信号処理ボード(DSP- 6367)[4-5]をインストールし、200Hz のサンプリング時間でセミアクティブ制御実験を行った。DSP ボードはそれぞれ 4 チャンネルの分解能 14bit の AD コンバーターと 16bit の DA コンバーターを備えている。図 5.2 に示すようなブロック線図のセミアクティブ制御則を C コードにより生成し、リアルタイムで MR ダンパーの荷重を制御する。AD コンバーターからの変位信号を微分した速度信号と、セミアクティブ制御則により算定した制御力から、式(2.1)の拡張ビンガムモデルにより目標荷重に相当する電流値を算定する。電流は DA コンバーターを経由し、安定化電源から MR ダンパーのコイルに印加する。なお、電磁石の定格電圧を超えないよう、印加電流の最大値を 3A に設定した。

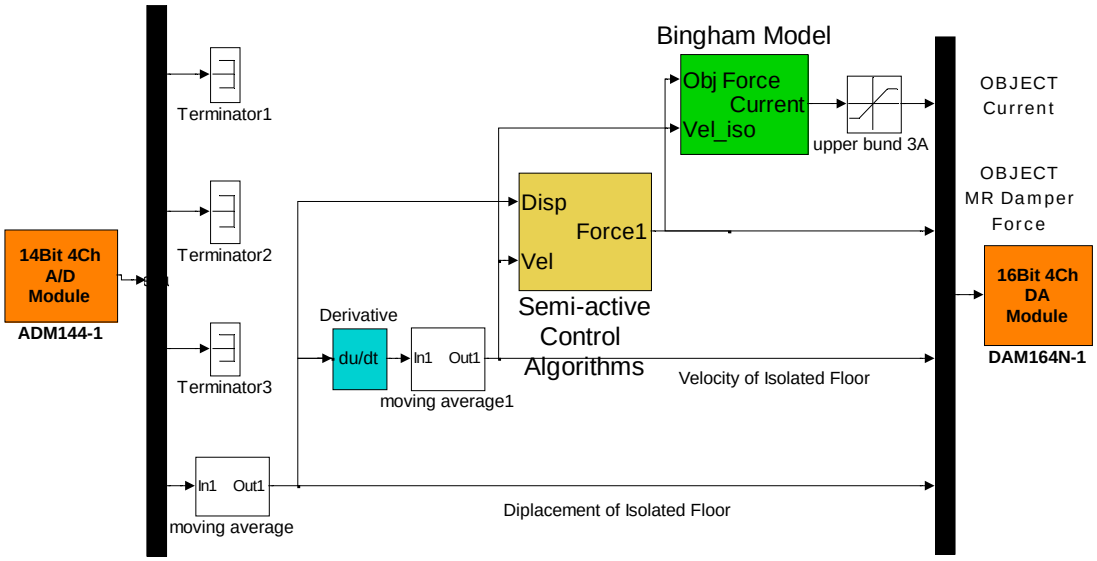


図 5.2 Simulink によるセミアクティブ制御

5.1.4　入力外乱

El-Centro(1940)NS、JMA Kobe(1995)NS、Hachinohe(1968)EW を用い、免震層の変位が MR ダンパーのピストンの制限変位を超えないよう、それぞれの地震波につき、その最大速度が 17kine、26kine、12kine になるよう規準化した。振動台上で記録した加速度波形の例を図 5.3 に示す。これらの振動台水平加速度をフーリエ変換し、得られたフーリエスペクトルを図 5.4 に示す。

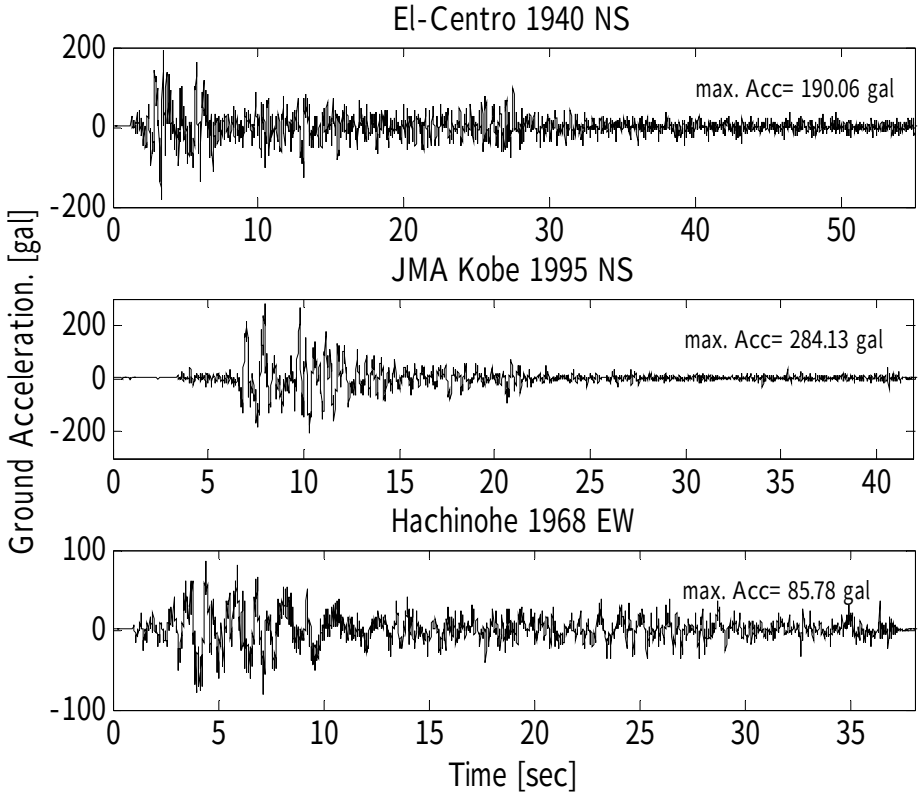


図 5. 3　振動台水平加速度の時刻歴

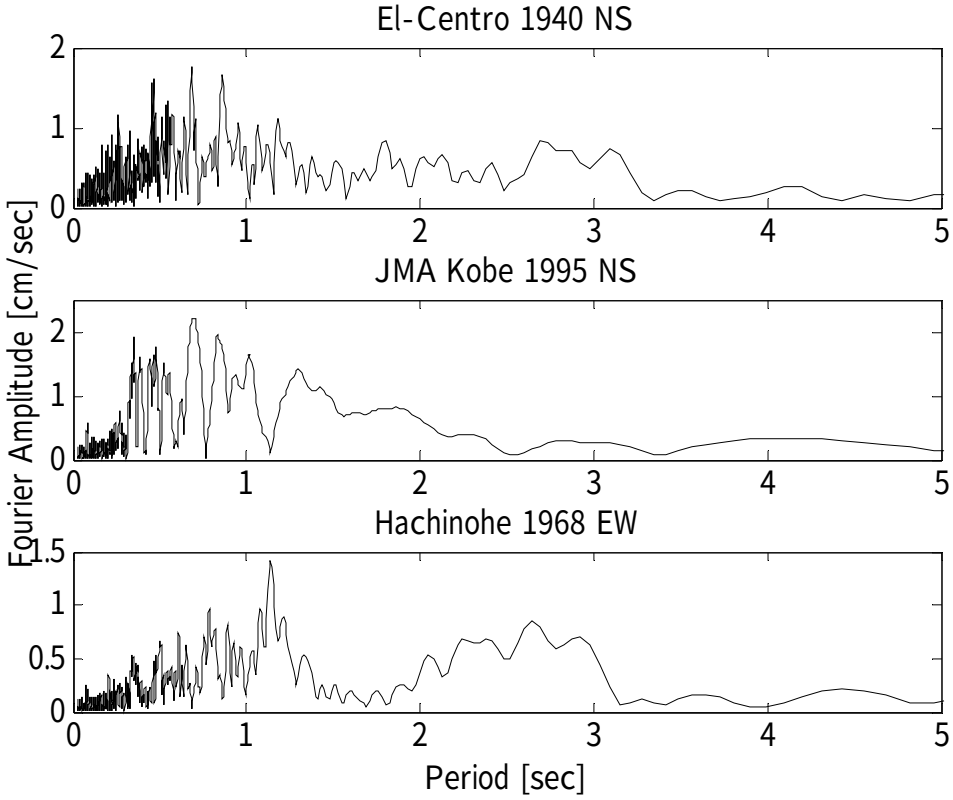


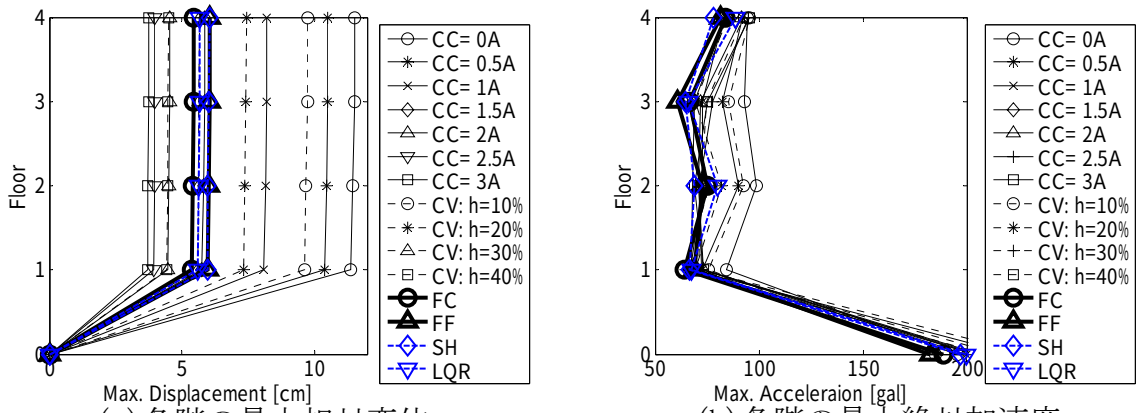
図 5. 4　振動台水平加速度のフーリエスペクトル

5.2　実験結果および考察

5.2.1 各階最大応答に基づく考察

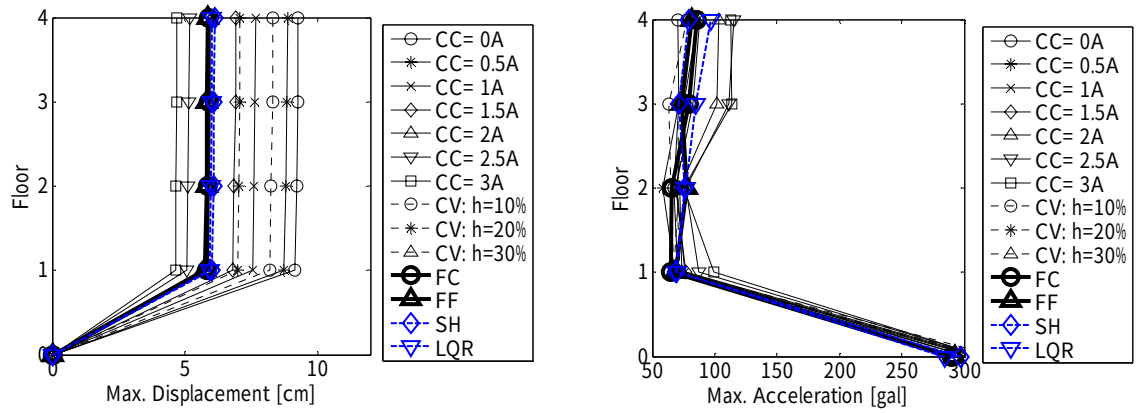
使用した入力地震動ごとに、基礎(Floor : 0)に対する各階床の最大変位(Floor : 1～4)の分布を図5.5- 5.7に示す。図中の記号は4.2節に記した制御アルゴリズムの違いに対応している。セミアクティブ制御の結果は、前述の方法による最適化パラメータを用いた場合に対応している。図5.5- 5.7の(b)は各階の最大絶対加速度である。これらの図に基く考察の要約は下記の通りになる。

パッシブ制御(CC, CV)では条件の設定の違いにより応答の変動幅が広いが、セミアクティブ制御では何れの地震波、何れのセミアクティブ制御則(FC, FF, SH, LQR)の組み合わせに関わらず応答の変動幅は小さく、良好な制御効果が得られる。また、制御において免震床の応答情報のみに基いて制御している事の誤差は十分に小さいものと考えられる。



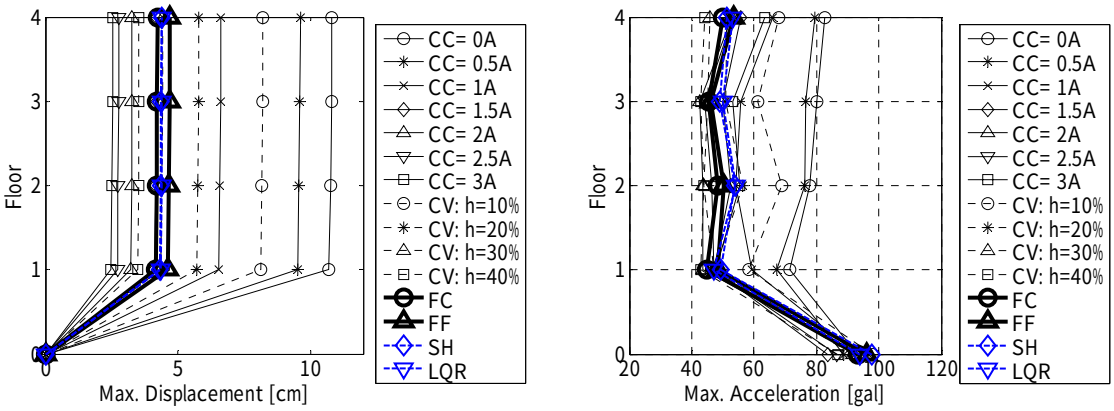
(a)各階の最大相対変位　　(b)各階の最大絶対加速度

図 5.5　El-Centro NS 17kine 入力時の各階の最大応答



(a)各階の最大相対変位　　(b)各階の最大絶対加速度

図 5.6　Kobe NS 26kine 入力時の各階の最大応答



(a)各階の最大相対変位　　(b)　各階の最大絶対加速度

図 5.7　Hachinohe EW 12kine 入力時の各階の最大応答

5.2.2 履歴に基づく考察

1)定電流制御の荷重変形関係

図 5.8 は、El-Centro(1940)NS17kine 波を用いて MR ダンパーの定電流制御を行った時の荷重とピストン変位の関係である。安定した履歴が得られ、印加電流の増加によってダンパー荷重が増加するとともに変位が低減している。ただし、ダンパーの荷重が過度に増加すると上部構造の加速度が増加する要因となり易い事を図 5.5-5.7 中の CC 制御における印加電流値の違いに対応して確認できる。

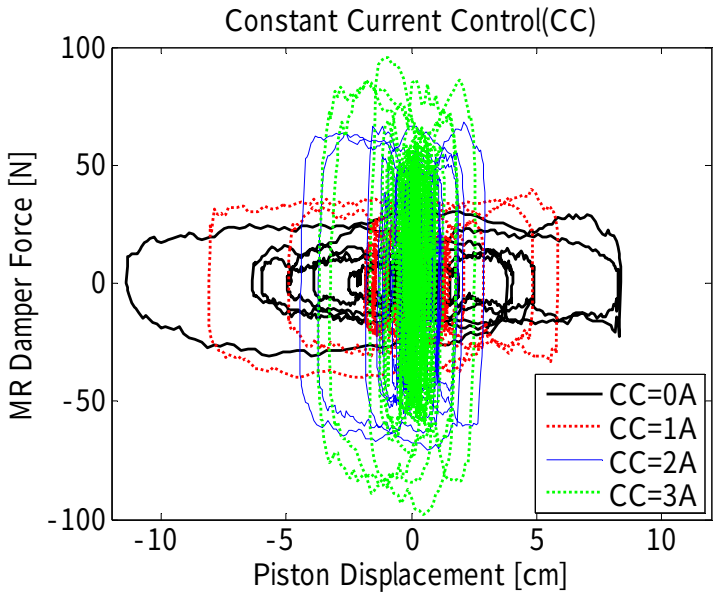
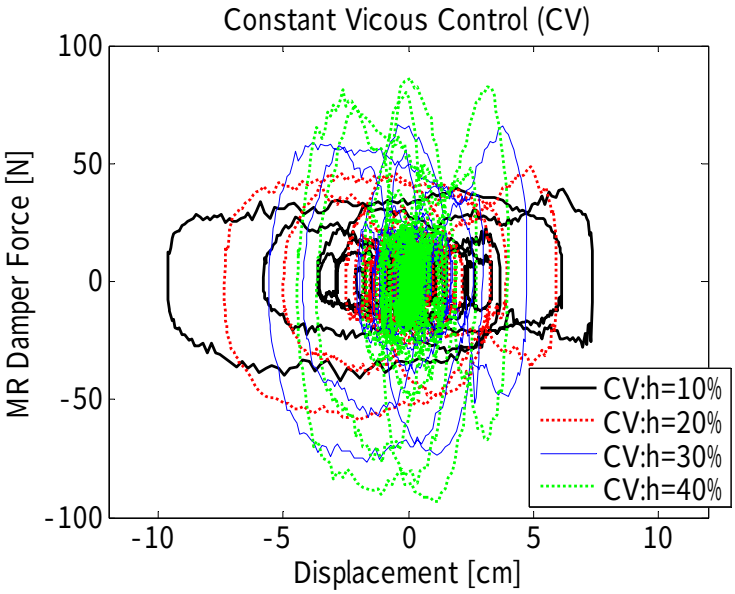


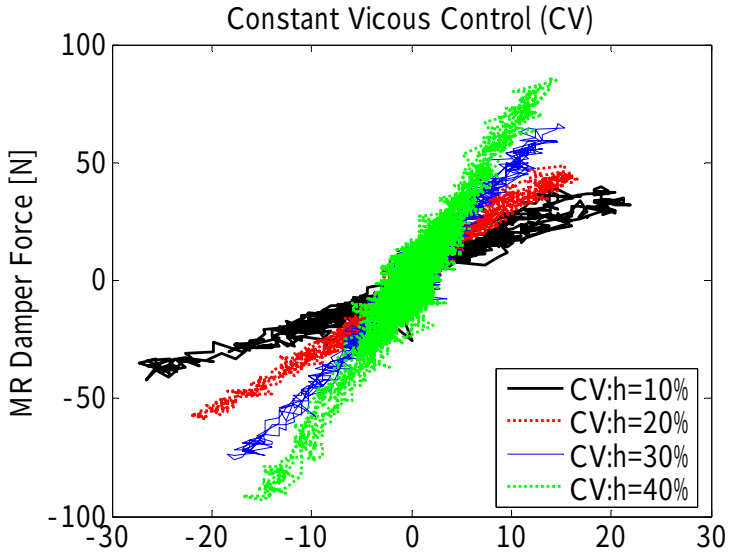
図 5.8　CC 制御の荷重-変形関係

2) 速度比例減衰の荷重変形および荷重速度関係

図 5.9(a)は、El-Centro(1940)NS17kine 波に対する MR ダンパーの CV 制御の荷重とピストン変位の関係である。想定する減衰定数が増加するにつれ、ダンパー荷重が増加し、変位が低減する一方で加速度応答が増加するのは CC 制御と同じ傾向であるが、CC 制御よりも加速度応答を増加させる好ましくない影響は小さい。図 5.9(b)は、本 CV 制御におけるダンパーの速度と抵抗力の関係例を示す。完全な粘性減衰であればこの関係は直線になるはずである。MR ダンパーは本来非線形であるので必ずしも直線にならないが、実験において、この程度には粘性減衰を模擬できている事を確認できる。本制御において、変位のピーク（速度がゼロ）で荷重がゼロにならないのは、ダンパーの摩擦の影響と考えられる。



(a) 荷重−変形関係

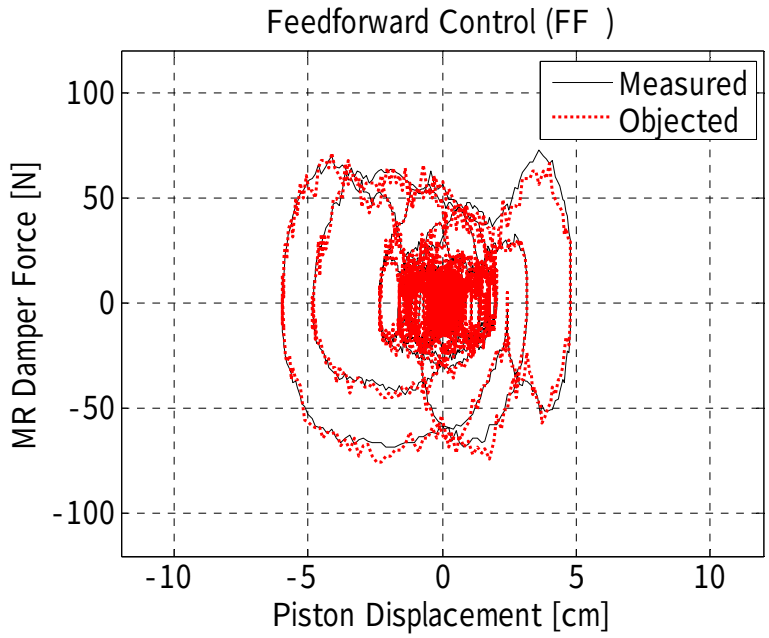


(b) 荷重−速度関係

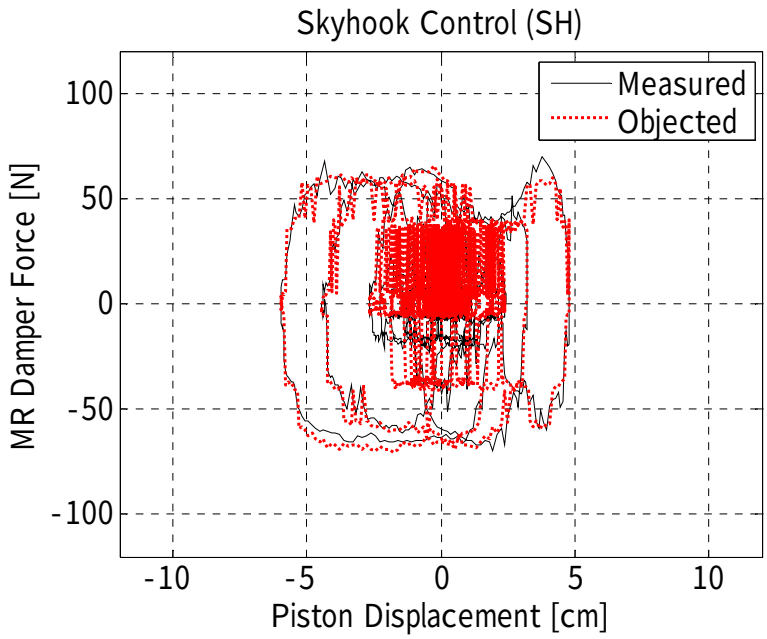
図 5.9　CV 制御の履歴

3) 各セミアクティブ制御の荷重変形関係

El-Centro(1940)NS17kine 波を用いたセミアクティブ制御により得られた免震層の荷重変形関係の例を図 5.10 に示す。(a)図は FF 制御、(b)図は SH 制御の場合である。太い実線はロードセルの実測荷重と実測変位の履歴、細い実線は各制御則に基づいて算定した目標荷重と実測変位との履歴である。FF 及び SH のセミアクティブ制御が制御則通りに実現されて居ることを確認できる。



(a) 速度予測制御の履歴



(b) スカイフック制御の履歴

図 5. 10　目標履歴と実測履歴の比較

5.2.3 応答予測制御に関する考察

図 5.11 は Hachinohe(1968)EW12kine 波を用いて、FF 制御を行った場合の免震層が変形ゼロを通過する時点の予測速度（○印）と実測速度の絶対値の時刻歴である。4.2.4 項の図 4.7 に見られる程度の予測誤差が伴うため、図 5.11 でも半サイクルごとに予測した速度は、全てのピーク速度に対応しないが、予測した速度の傾向は概ね実測速度と同等である。この予測した速度を用い、式(4.7)により決めた減衰定数の時刻歴を図 5.12 に示す。さらに、この減衰定数と免震層相対速度を用い、式(4.6)に与える制御力と印加電流の時刻歴を図 5.13 に示す。これらの印加電流の変化は、免震層相対速度の変化と対応する。

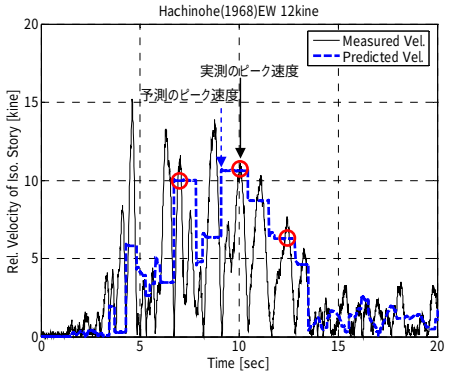


図 5.11　予測速度と実測速度の時刻歴（FF 制御）

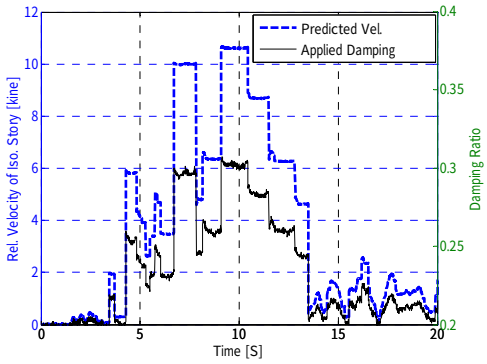


図 5.12　予測速度と実測減衰定数の時刻歴（FF 制御）

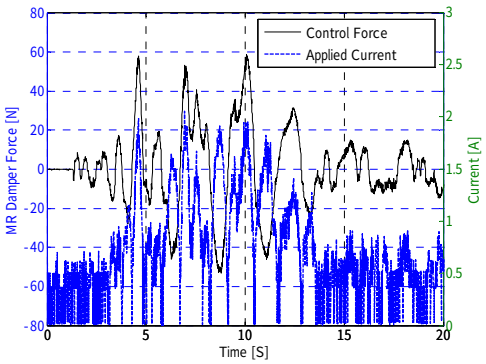


図 5.13　FF 制御による印加電流と荷重の関係

5.2.4 応答変位と応答加速度のトレードオフ関係

セミアクティブ制御およびパッシブ制御の制振効果を比較するため、図 5.14-5.16 に、各制御アルゴリズムを用いた振動台実験から得られた最上階の最大絶対加速度と免震層の最大変位の関係をプロットした結果を示す。プロットが原点に近いほど、総合的に、より制御効果が高いと考えている。

1)パッシブ制御の考察

Kobe 波の場合において、CC 制御の印加電流と CV 制御で設定する減衰定数が高いほど応答変位は抑えられているが、最大応答加速度はほぼ単調に増加している。これに対して、El-Centro 波の場合には、変位に関してはほぼ同じ傾向であるが、最大加速度は印加電流の増加とともに一旦下がってから再び増加する。Hachinohe 波の場合には、CC 制御では El-Centro 波の場合と同様に加速度応答が極値を有するのに対して、CV 制御では減衰定数の増加につれて、変位、加速度の何れも単調に減少する。Hachinohe 波における CV 制御、また、Kobe 波における両制御実験結果で加速度応答に極値が見られていないが、4.3.5 項の事前解析ではいずれにおいても僅かに極値が認められている。これは、実験パラメータの範囲の選択が影響したものと思われる。このようにパッシブ制御におけるトレードオフ関係は地震動の特性の影響を強く受ける。

2)セミアクティブ制御の考察

Kobe 波と Hachinohe 波に対して、LQR 制御による応答制御効果は CC 制御より良好な結果が得られるが、El-Centro 波に対しては、LQR 制御の効果が低い結果となった。El-Centro 波と Kobe 波に対する SH 制御の効果は良好な結果となったが、Hachinohe 波に対しては CV 制御よりも効果が低い結果となった。

El-Centro 波と Kobe 波に対する FC 制御と FF 制御は、CC 制御および CV 制御と比較すると、最大応答変位の制御効果は同等であるものの、最大応答加速度はよく抑制する結果となった。Hachinohe 波については、CC 制御と比較して良い制御効果が得られるものの、CV 制御よりは効果が低い結果となった。Kobe 波に対しては、FF 制御の制御効果が FC 制御より若干良く、Hachinohe 波に対しては、FC 制御の結果が、FF 制御より若干良い。

総括的に言えば、セミアクティブ制御が常にパッシブ制御より良い制振効果をもたらすとは言えないものの、パッシブ制御は減衰機構の違いやパラメータの設定値の違いによる制御効果への影響が大きい。一方、応答予測制御（FF 制御）やファジィ制御は、定電流制御より良い制御効果を得ることが出来、Hachinohe 波に対して速度比例制御はより加速度を抑えることが確認されるなど、地震動の違いによらず、絶対値としては安定した応答抑制に有効な手法と考えられる。

次に、第 6 章では本章の小型試験体のセミアクティブ制御実験結果を基に、40kN と大型 3 層免震鉄骨フレームを組み合わせて、本章に述べた制御アルゴリズムを利用し、その制御効果を検証すること。

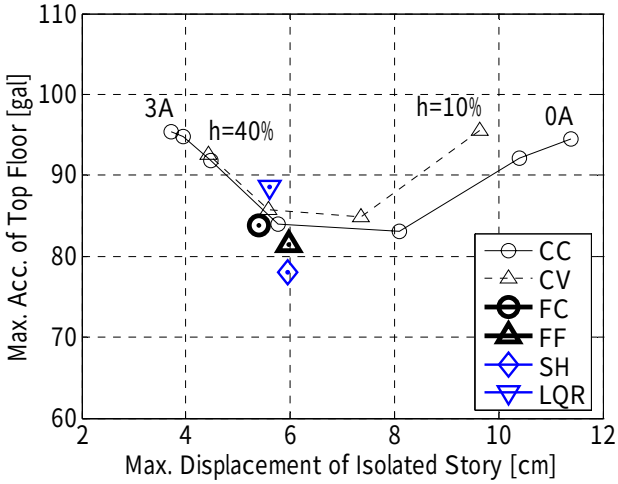


図5.14　El-Centro NS 17kineを用いた最上階加速度と免震層最大変位の関係

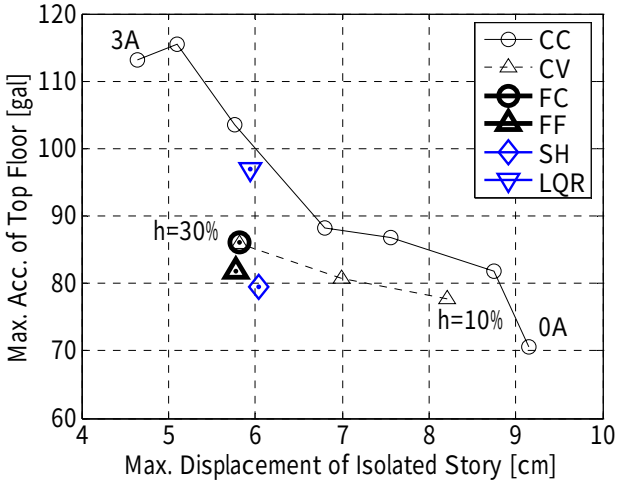


図5.15　JMA Kobe NS 26kineを用いた最上階加速度と免震層最大変位の関係

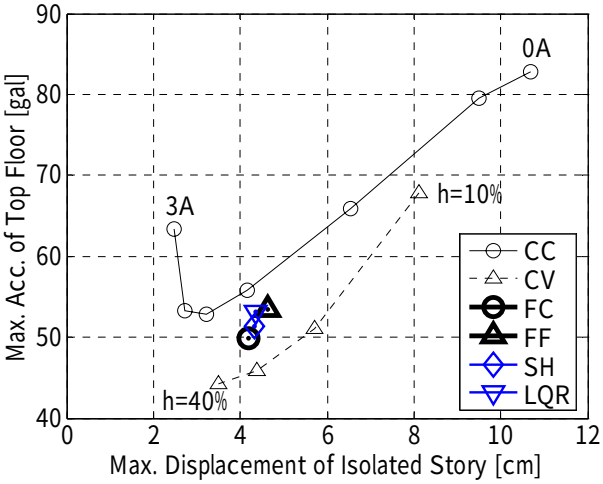


図5.16　Hachinohe EW 12kineを用いた最上階加速度と免震層最大変位の関係

5.3 まとめ

本章では、MR ダンパーによるセミアクティブ制御の振動台実験を行い、そちらの実験結果および考察を記す。振動台実験結果を元に、得られた主な知見は以下の通りである。

1)小型免震フレームと小型 MR ダンパーの組み合わせによる振動台実験によっても、研究の目標である、多様なパッシブ制御とセミアクティブ制御の比較検討を達成する事ができた。

2)パッシブ制御においても十分に応答は低減できるものの、最適な制御のための条件設定が難しく、地震動特性の影響を強く受ける。

3)セミアクティブ制御が常にパッシブ制御を上回る結果とはならなかったものの、応答予測を交えたセミアクティブ制御は比較的良好かつ安定した制御効果を発揮すると考えられる。

4)セミアクティブ制御のための最適なパラメータを決めるための事前解析結果と、実験結果との対応は概ね良好であり、ダンパーのモデル化や、1 自由度系による近似制御に大きな問題の無いことを確認できた。

第 5 章の参考文献

1)Dabney J.B. and Harman T. L.: Mastering Simulink, pp.49-218, Person Education, 2004

2)Simulink ~ Simulations and Model-Based Design ~ Using Simulink, Version 6, The Mathworks 2005

3)Fuzzy Logic Control Toolbox ~ for Use with Matlab ~ User's Guide, Version 2, The Mathworks, 2005

4)Heron シリーズ DSP6367 サポートディスク インストール マニュアル、エムティティ社、2004.5

5)DSP6067/DSP6367 対応･MATLAB(R14SP3)/RTW 実稼働システム･Pass/C67、取扱説明書、エムティティ社、2005

第 6 章

大型 3 層免震フレームのシミュレーション解析

MR ダンパーを利用する構造形式としては、制振建物の 1 層のみに設置する形式、全層に設置する形式、免震建物における免震層に設置する形式が代表的なシステムとして挙げられる。本研究は、免震建物の免震層に MR ダンパーを設置することによる制振効果について解析的に検討する。前章では、小型 MR ダンパーを 3 層免震鉄骨フレームの免震層に取り付け、提案された FC 制御と FF 制御の制振効果を検証するため、パッシブ制御の CC 制御と CV 制御、およびセミアクティブ制御の LQR 制御と SH 制御による地震応答を比較した。実験結果より、最適パッシブ制御では地震波による違いが見られた一方で、提案した FC 制御及び振動エネルギーによるピーク速度応答値の予測の FF 制御では、地震波によらず優れた制振効果とロバスト性の高いことを確認した。

パッシブダンパーの減衰力の大小は、構造物の応答の大小に依存することから、地震動の規模や特性によって減衰力が十分に発揮できない場合がある。前章は 2.6 秒程度の免震建物に対して、MR ダンパーにより建物の応答加速度と応答変位を共に抑制できることを確認できた。本章では、種々の地震動に対して、50kine(レベル 2)程度の地震を想定し、1 層のみに MR ダンパーを設置する大型の免震建物モデルの応答低減効果を解析により検討する。6.1 節には、1998 年～2002 年の間に行われた日米共同研究で使用された 40kN の MR ダンパーと 3 層免震建物モデルの力学特性を記す。6.2 節には、解析モデルと状態方程式、入力地震波の種類とレベル、MATLAB/Simulink による数値シミュレーション解析の特徴と数値計算の方法を記す。6.3 節には、解析において、各パッシブ制御則とセミアクティブ制御則の種類とパラメータの設定を記す。6.4 節には、解析の結果を示し、応答の時刻歴やダンパーの荷重変形、最大応答のトレードオフの関係より、パッシブにおいて CC 制御の 0A(無印加)、0.6A(最大印加電流)、CV 制御の減衰定数 h=30%、およびセミアクティブ制御の LQR 制御、SH 制御、FC 制御、FF 制御、SHC 制御の制振効果の比較検討を記す。

6.1　大型 MR ダンパーおよび検証対象建物の概要 [1)]

6.1.1 40kN 級 MR ダンパーと力学特性

1）MR ダンパー構造

図 1 に示す 40kN 級 MR ダンパーの構造は、第 2 章で力学特性を検証した 100N 級小型 MR ダンパーの構造と同様に、ダンパーにバイパス部が設けられたバイパス式流路を有する MR ダンパーである。バイパス部に設けられた環状オリフィスを挟むように電磁石が配置されている。また、MR 流体はオリフィス部を通過する際に、MR 流体の持つ粘性による荷重が発生する。これはオイルダンパーにおいて、オイルダンパーに封入されたオイルがオリフィス部を通過する際に、オイルの粘性による荷重が発揮されるメカニズムと同様である。40kN 級 MR ダンパーは、最大速度 100kine 程度に対応し、磁場を印加しない状態での発生荷重を極力抑えるため、オリフィスの流路隙間が 3mm となっている。一方、磁場を作用させた際の荷重が大きくなるために、電磁石の数を 12 個にすると同時に、オリフィス部が 420mm で長く設計されている。免震用 MR ダンパーの特徴として、大きな変位が生じる免震構造物の免震層への適用が想定されていることから、ロッドのストローク長が±295mm と長いことがあげられる。40kN 級 MR ダンパーの諸元を表 6.1 に示す。

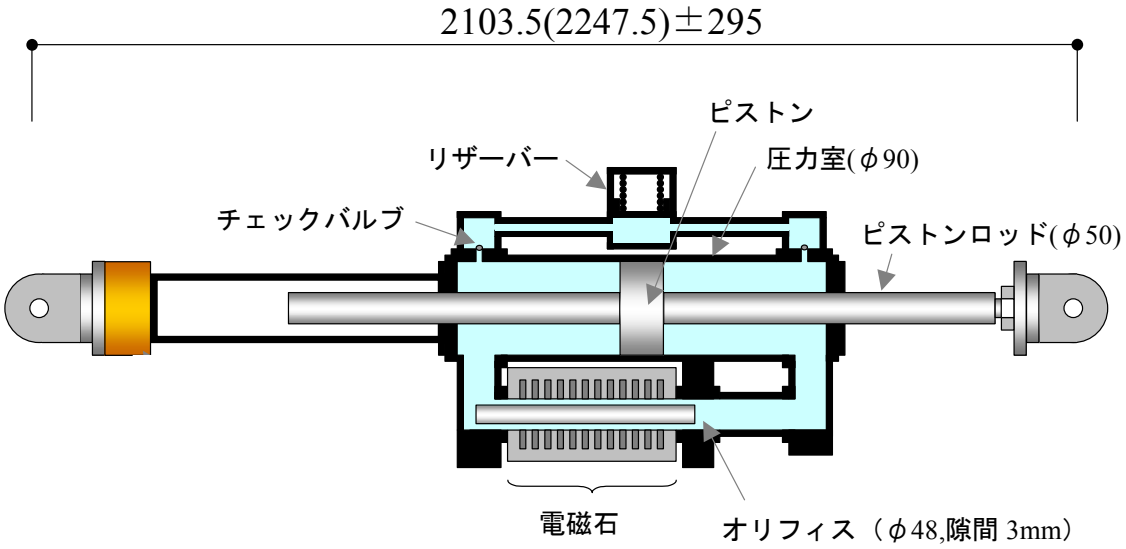


図 6.1　40kN 免震用の MR ダンパー

表 6.1　大型 MR ダンパーの設計仕様

容量		40kN
ストローク		±295mm
シリンダ径		φ90mm
ピストンロッド径		φ50mm
オリフィス	流路断面	外径　φ48mm
		隙間　3.0mm
	長さ	420mm（240mm）
電磁石	抵抗	12Ω×3
	インダクタンス	37.4mH×3
	最大電流	3.0A
MR流体	型番	バンドー化学社（#230）
	分散媒	炭化水素系オイル
	分散質割合	83 wt%
	密度	3.3×103 kg/m^3

2)MR ダンパーの力学特性

このダンパーに種々の振幅と振動数の定常な正弦波変位を繰り返し作用させて安定した荷重変形関係（履歴ループ）が得られた。図6.2に示すように、電流がゼロの場合はニュートン流体による通常のオイルダンパーと良く似た履歴を発揮する。電流を加えることによりダンパーが動き出すための最低限の荷重に相当する抵抗力が加算されて、流体そのもののせん断特性に類似した特性が発揮される。

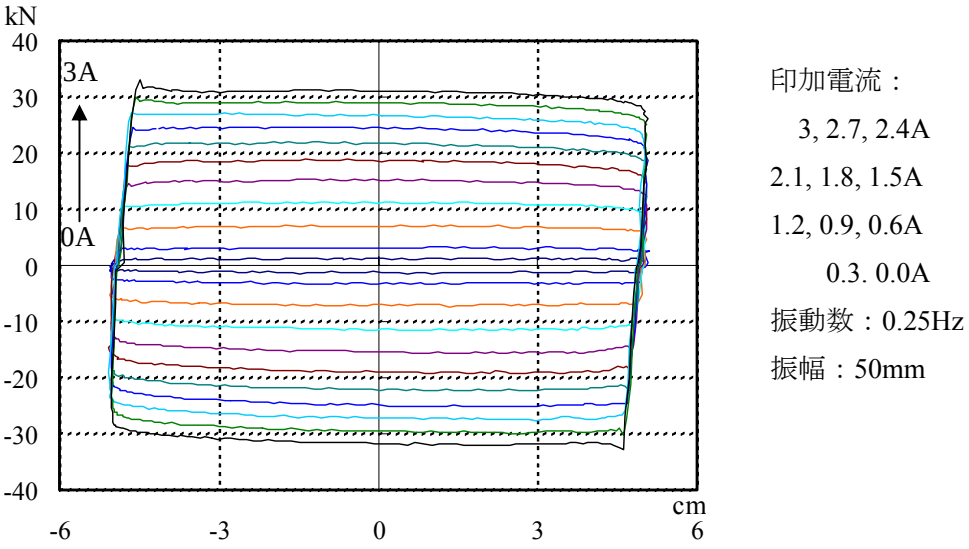


図 6.2　40kN の正弦波加振による荷重-変形関係

次に最大速度と最大荷重の関係を図 6.3 に示す。同図には一次回帰関数の速度に係る係数を電流値ごとに求めた場合と同じ値にしたものも記している。

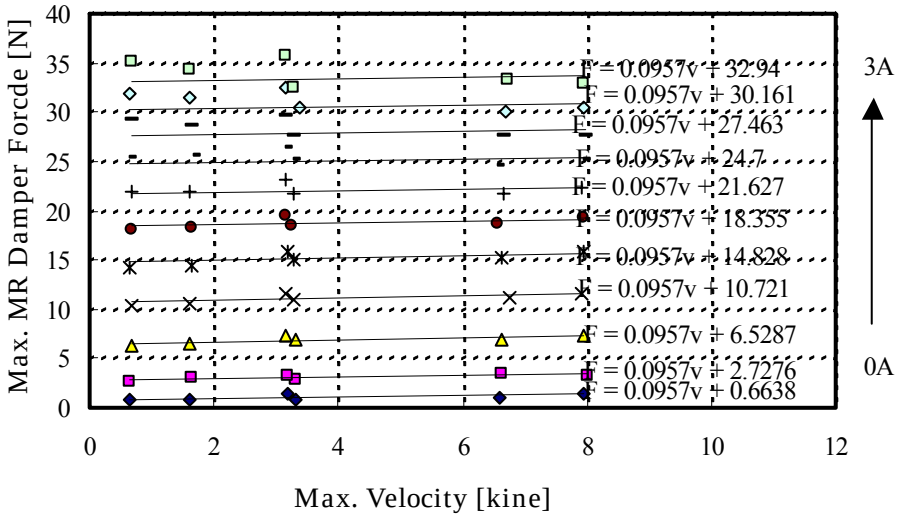


図 6.3　40kN の正弦波加振による最大荷重-最大速度関係

2) MR ダンパーのモデル化

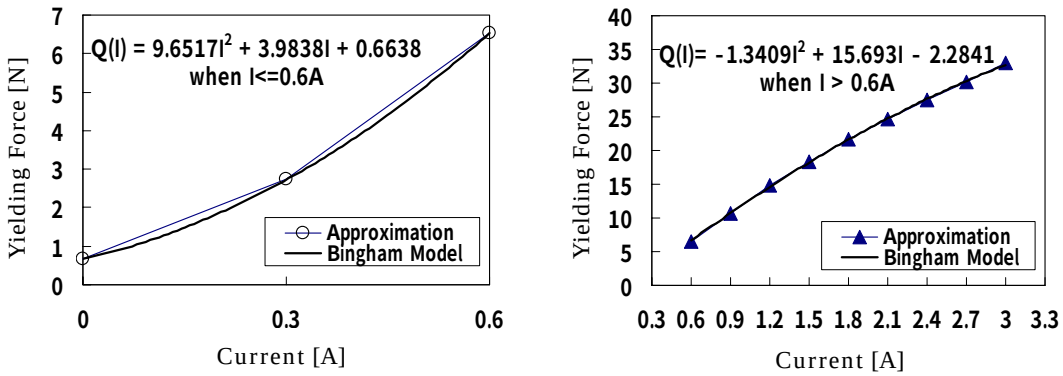
抵抗力とその制御信号となる電流値の関係では、第 2 章で述べた拡張ビンガムモデルで模擬することができ、ダンパーの抵抗力は(6.1)式で表すことが確認されている。ダンパーの粘性係数が定数で、可変降伏耐力ともに印加電流の 2 次関数に回帰して近似し、図 6.4 に示すように、0.6A を境にして係数を変えてある。

$$F_{MR} = C*V + Q(I) \tag{6.1}$$

ここに、

C：粘性係数=0.0957(N・s/cm)、Q：降伏耐力(N)

V：ピストン速度(kine)、I：印加電流(A)



(a) 降伏耐力の電流依存性
(0 ≤ I ≤ 0.6A)

(b) 降伏耐力の電流依存性
(0.6A ≤ I ≤ 3.0A)

図 6.4　拡張ビンガムモデルによる MR ダンパー荷重の同定

6.1.2 大型の 3 層免震建物モデル

2002 年に日米スマートでは、種々の研究・開発の適用可能性を検証するために、独立行政法人防災科学技術研究所(防災科研)において3層の大型(実大の約2/3)鉄骨構造モデルを用いた振動台加振を行った。そちらの実験結果が報告されている。この試験体には、免震層にローラーベアリングと積層ゴムを取り付けて、固有周期の長い免震構造システムとしている。前節でモデル化の結果を示した 40kN の MR ダンパーを含む構造システムの全体を写真 6.1 に示す。上部構造(試験体フレームの固有周期は約 0.49 秒)はローラーベアリングに支持され、水平剛性としては鉛直力を支える事の無い積層ゴム 4 基を用いることで、1 次固有周期は 2.8 秒となっている。フレームの質量と剛性の分布、免震層の諸元をそれぞれ表 6.2、6.3 に示す。

写真 6.1　3 層鉄骨造免震建物モデル

表 6.2　鉄骨試験体の諸元

階	剛性[kN/m]	質量[ton]
屋根	-	4.67
3	2097.5	4.78
2	2812.0	4.78
1	3894.3	6.00

表 6.3　免震層の諸元

積層ゴム	剛性	101[kN/m]
	減衰	4.44[kN･s/m]
転がり支承	摩擦力	0.692 [kN]

6.2　地震応答解析方法

6.2.1 解析モデル

図 6.5 には、上記免震試験体のセミアクティブ制御用の解析モデルを示す。上部構造を 4 質点系(m_0~m_4)、積層ゴムの水平剛性と粘性係数を線形バネ(k_0)とダッシュポット(C_0)、ローラーベアリングを摩擦要素(F_r)で代表する。これらの変数を用いて運動方程式は式(4.1)となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_S\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{r}F_r + \mathbf{r}F_{MR} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g \tag{6.2}$$

ここに、**M** は質量マトリクス、**K** は剛性マトリクス、$\mathbf{C}_s$は減衰係数マトリクスである。また、$\mathbf{1} = [1\ 1\ 1\ 1]^T$ は単位ベクトル、$\mathbf{x} = [x_0 \Lambda\ x_3]^T$ は各階の基礎に対する相対変位、x_g は基礎の絶対変位、$\mathbf{r} = [1\ 0\ 0\ 0]^T$ は MR ダンパーの設置位置を表すベクトルである。

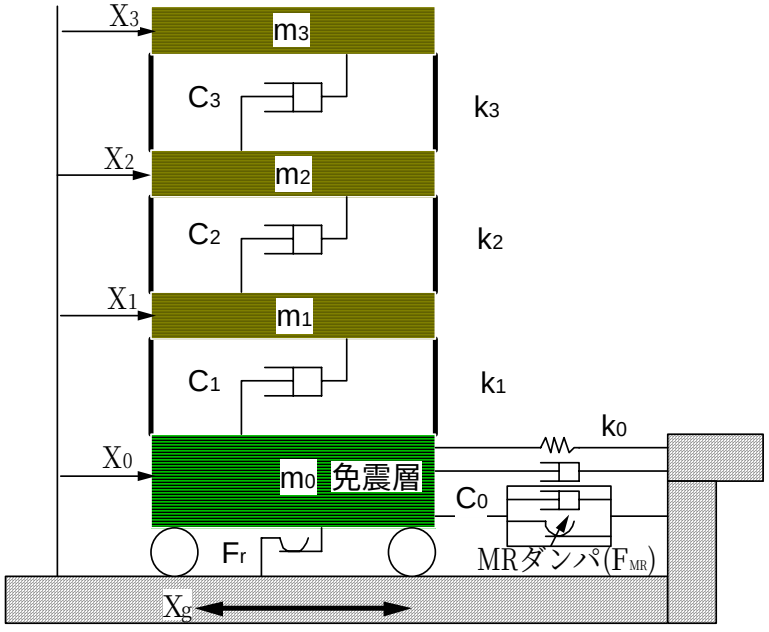


図 6.5　地震応答用解析モデル

式(4.2)を相対加速度ベクトルで表すと、下記の通りになる。

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_S\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{1}\ddot{x}_g - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}F_r - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}F_{MR} \tag{6.3}$$

状態ベクタルを下記の各層の相対変位と相対速度に設定し、

ここで、 $\mathbf{z} = [z_1 \Lambda\ z_8]^{\mathbf{T}} = [x_0 \Lambda\ x_3\ \dot{x}_0 \Lambda\ \dot{x}_3]^{\mathbf{T}}$

さらに、出力ベクトルを各層の相対変位、相対速度、相対加速度

$$\mathbf{y} = [y_1 \Lambda\ y_{12}] = [x_0 \Lambda\ x_3\ \dot{x}_0 \Lambda\ \dot{x}_3\ \ddot{x}_0 \Lambda\ \ddot{x}_3]^{\mathbf{T}}$$

とすれば、式(4.3)の状態方程式と式(4.4)の出力方程式が得られる。

状態方程式： $\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{Az} + \mathbf{Bf}$ (6.4)

出力方程式： $\mathbf{y} = \mathbf{Cz} + \mathbf{Df}$ (6.5)

ここに、A，B，C，D は下記の通りである。

システムマトリクス　$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4\times4} & \mathbf{I}_{4\times4} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_{\mathbf{S}} \end{bmatrix}$

入力マトリクス　$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} \\ -\mathbf{1} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} \end{bmatrix}$

出力マトリクス　$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{4\times4} & \mathbf{0}_{4\times4} \\ \mathbf{0}_{4\times4} & \mathbf{I}_{4\times4} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_{\mathbf{S}} \end{bmatrix}$

直達マトリクス　$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} \\ \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} \\ -\mathbf{1} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} \end{bmatrix}$

入力ベクトル　$\mathbf{f} = [\ddot{x}_g \quad F_r \quad F_{MR}]$

6.2.2 入力地震波

入力地震波では、振動台上で記録した加速度波形 El-Centro(1940)NS、JMA Kobe(1995)NS、Hachinohe(1968)EW を用い、免震層の変位が MR ダンパーのピストンの制限変位を超えないよう、それぞれの地震波につき、その最大速度が 50kine に規準化したものである。即ち、各地震動においてレベル 2 を想定し制御則の有用性を検証する。

6.2.3 MATLAB/Simulink を用いるシミュレーション

本項は、パッシブ制御とセミアクティブ制御の地震応答解析の概要を示す。まずはじめに、前記の地震応答解析モデル、地震波、制御パラメータなどの情報を用い、Simulink による種々のブロック線図を組み合わせ、各制御則の解析プログラムを作成する。セミアクテ

ィブ制御の 1 例（FF 制御）を図 6.6 に示す。白色のブロックが入力の地震動と出力の各階の地震応答、MR ダンパーの減衰力など、赤色が式(6.4)と式(6.5)による免震建物のモデル、オレンジ色が FF 制御のアルゴリズムと免震層の転がり摩擦力のモデルを示している。

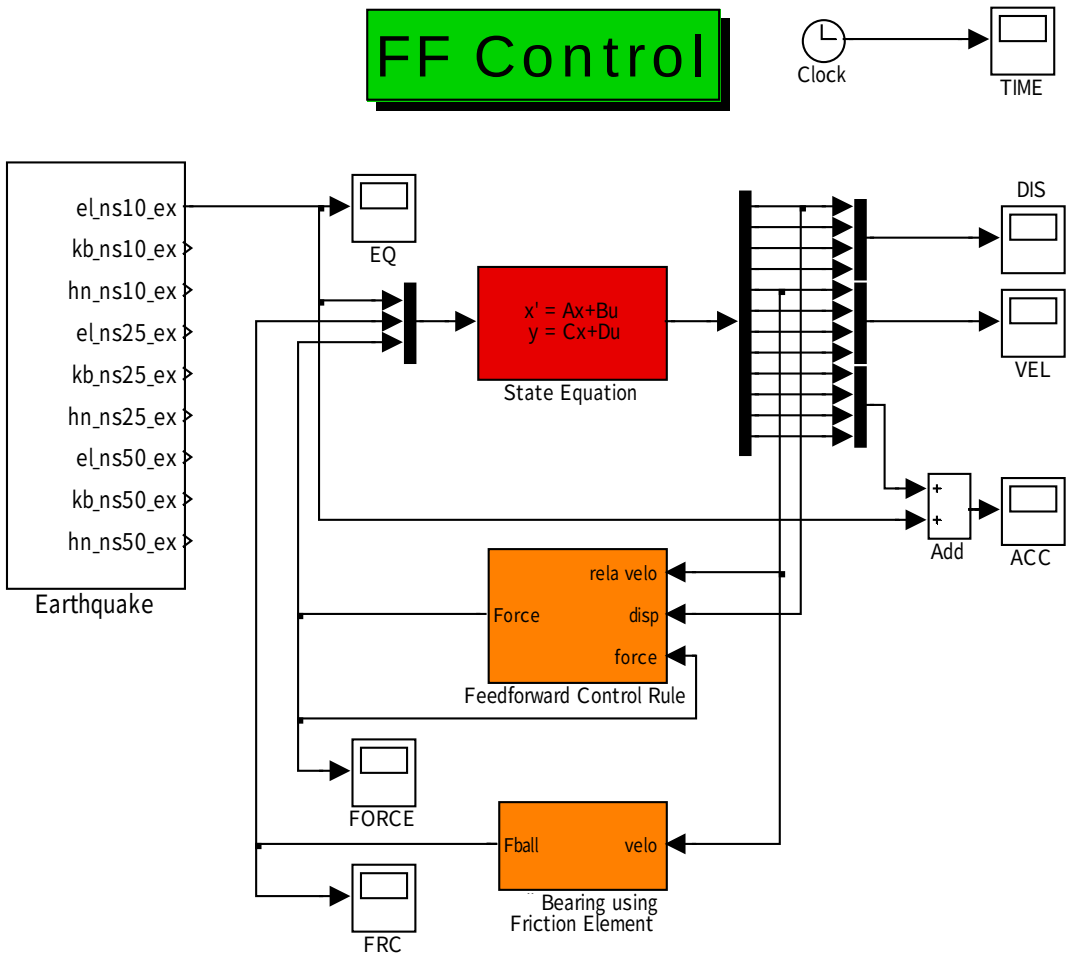


図 6.6　Simulink による FF 制御アルゴリズムのプログラム

ソルバ[2-3]については、CC 制御や CV 制御、LQR 制御、SH 制御、FF 制御が可変ステップのソルバの ode45(Dormand-Prince)を用い、FC 制御が 0.01sec の固定ステップソルバ ode5(Dormand-Prince)を使用している。ode45 が精度および計算速度の面で最もバランスのとれた 4 次の Runge-Kutta に基づくソルバであり、ode5 が Dormand-Prince による陽的の 5 次の Runge-Kutta 公式に基づくソルバである。

6.3 制御パラメータ

実大のフレームに対して、4.3 節に記した方法で各制御則は以下のパラメータを用い、地震応答解析を行う。

1) 定電流制御

電流無印加 0 や一定電流 0.2, 0.4 , 0.6A を変化させて、定電流によるパッシブ制振効果を検証する。

2) 速度比例減衰制御

パッシブオイルダンパーの制振効果と比較するた、減衰定数 10%, 20% , 30%, 40%, 50%, 60%。を変化させて、オイルダンパーの地震応答の低減効果を検証する。

3) 最適レギュレータ

一連の試行錯誤により、応答変位と応答速度に対する重み関数が **Q**=diag([0.25 0.25])、制御力に対する重み関数が R=1 を用い、フィードバックゲインは、式(4.5)より **K=diag([**-0.025 -0.3705])となる。

4) スカイフック制御

免震層の相対変位に応じて、一定の電流を MR ダンパーに印加する。（以下、SH 制御）

$$\text{印加電流値}\qquad \mathrm{I}=\begin{cases}0.9\mathrm{A} & |v|>30kine\\ 0.6\mathrm{A} & for\ \ 15kine\le|v|\le 30kine\\ 0.3\mathrm{A} & |v|<15kine\end{cases} \tag{6.6}$$

前記の MR ダンパーによる SH 制御セミアクティブ制御の研究を行っている一方、井上ら[4-5](2006)は免震構造物と絶対座標系との間に固定された SH ダンパーの減衰係数 C_{sky} を仮定し、(4.2)式に示すように、C_{sky} が発生する減衰力を MR ダンパーで発生させて、絶対速度と比例しており、提案した GS(Gain-Scheduled)制御との比較検討を行った。F_{MR} が MR ダンパーの減衰力、$\dot{x}_0$ が免震層の相対速度、$\dot{x}_g$ が地動の速度(地動の加速度を積分する)である。（以下、SHC 制御）

$$F_{MR}=\mathrm{C}_{sky}(\dot{x}_0+\dot{x}_g) \tag{6.7}$$

ここに、

C_{sky} を減衰定数 h=75％に相当する値に設定している。

5) ファジィ制御

免震層相対変位±35cm、免震層相対速度±50kine を 2 次元のファジィルールの前件部として、三角形のメンバーシップ関数を用い、後件部の最大荷重を±40kN に設定する。

6) 速度予測制御

4.3.4 節の応答予測制御により、半サイクルごとに変化する減衰定数は下式とする。一連の解析の結果により減衰定数を 5%～30%の間に設定している。

$$h_i=0.05+\alpha|V_i| \leqq 0.3 \tag{6.8}$$

ここに、α=0.015(s/cm)である。

6.4 解析結果と制御効果の検証

6.4.1 応答時刻歴およびダンパー履歴による考察

本節では、制御効果を説明するため、パッシブ制御の 3 種類（CC 制御 0A と 0.6A、CV 制御 h=30%）、およびセミアクティブ制御の 5 種類（LQR 制御、FC 制御、FF 制御、SH 制御、SHC 制御）の応答時刻歴およびダンパー履歴の考察を記す。

1) 応答変位と応答加速度の時刻歴に基づく考察

El-Centro 波、Kobe 波、Hachinohe 波を用い、各制御則を用いた免震層変位と最上階加速度をそれぞれ図 6.7-6.10、図 6.13-6.16、図 6.19-6.22 に示す。いずれの地震波いずれの制御則においても、免震層の振動周期は、免震建物の 1 次固有周期に(約 2.8 秒)に近いことを確認した。

また、最上階の加速応答の増加は、高次モードに強く影響され、特に CC 制御において、制御力は過大である。他の制御則と比較すると、加速応答の振幅が大きいことを確認した。一方、SHC 制御では、Kobe 波の場合において他のセミアクティブ制御と比較すると、加速度が顕著に低減された。

2) ダンパーの荷重変位関係に基づく考察

El-Centro 波、Kobe 波、Hachinohe 波を用い、各制御則により得られたダンパーの荷重変位関係をそれぞれ図 6.11-6.12、図 6.17-6.18、図 6.23-6.24 に示す。以下は各制御則によるダンパーの挙動の特徴を考察する。

a)CC 制御 0A(電流無印加)の場合では、いずれの地震波に対しても MR ダンパーの力学特性がオイルダンパーの楕円形履歴に近いことを確認できた。こちらの結果は 6.2 節の MR 流体の特徴と対応している。

b)CC 制御 0.6A の場合では、いずれの地震波に対しても若干粘性に依存し、電流（磁界）印加による降伏耐力を有することが確認した。

c)LQR 制御では、CV 制御 h=30%と比較すると、いずれの地震波に対しても応答変位がよく抑えられ、荷重が大きいことを確認した。

d)FC 制御と FF 制御の履歴を見ると、各地震波によって、履歴が違いことを確認し、これは FC 制御のファジィルール（前件部、後件部、メンバーシップ関数など）の設定、および FF 制御の予測精度、減衰印加のタイミングなどと関係あると考えられる。

e)SH 制御では、免震層速度によって決められる電流を印加したダンパーの荷重の変化を確認した。また、地震波によって履歴が若干負勾配を有することを確認できた。

f) SHC 制御の場合では、El-Centro 波と Hachinohe 波において、履歴の負勾配を顕著に有す

ことが確認された。また、Kobe 波において、履歴が負勾配を有しつつ、小振幅時にはオイルダンパーの楕円形で、大振幅時では摩擦ダンパーの長方形であることが明らかになった。

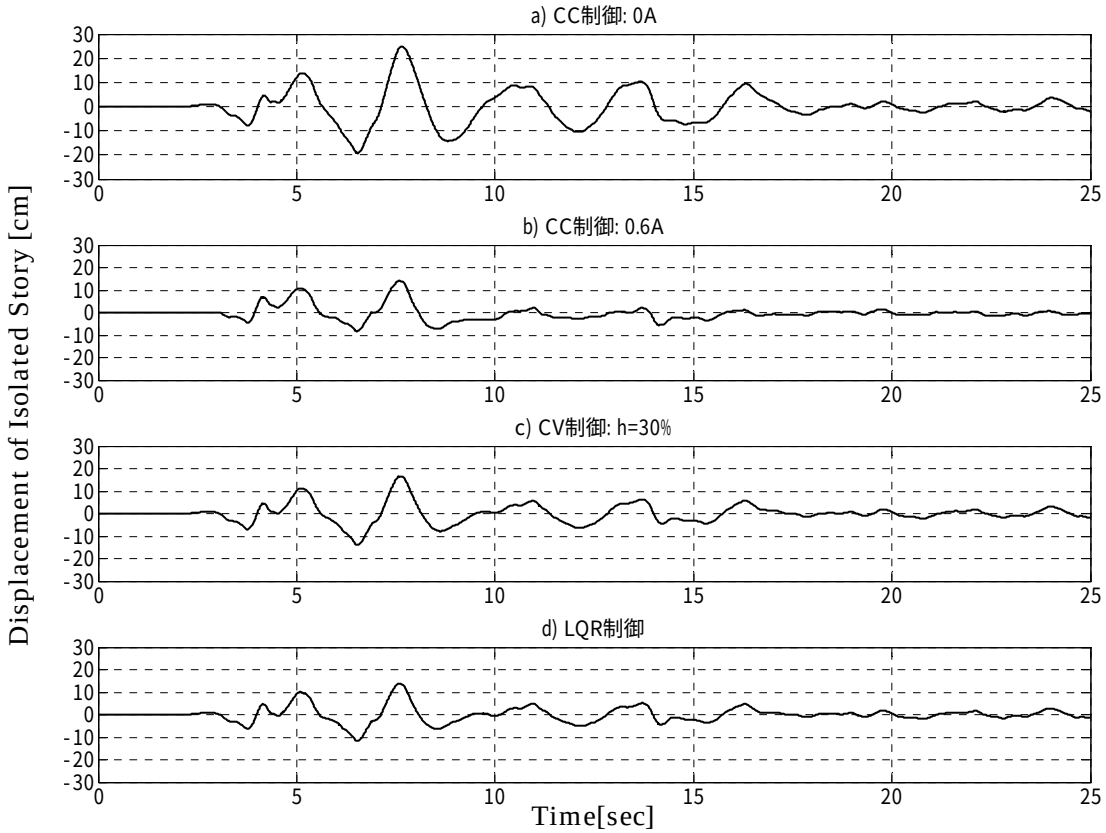


図 6.7　El-Centro NS 50kine 入力時の免震層変位の時刻歴

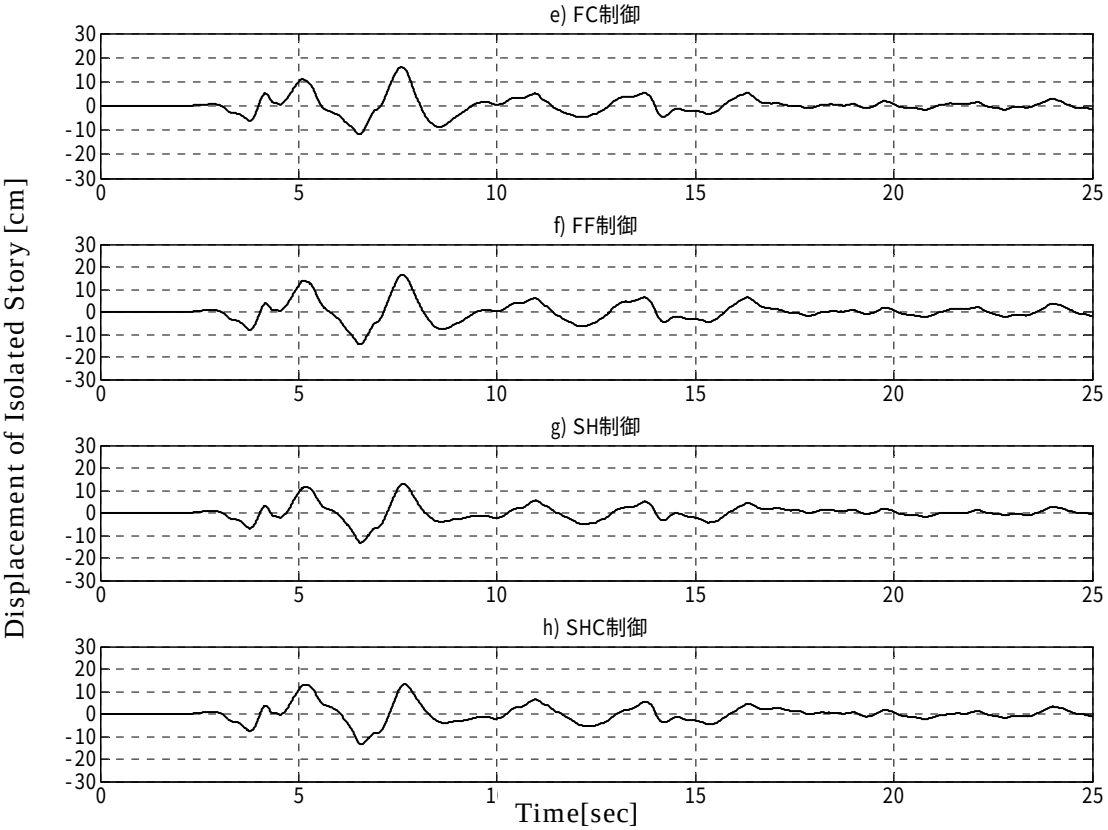


図 6.8　El-Centro NS 50kine 入力時の免震層変位の時刻歴

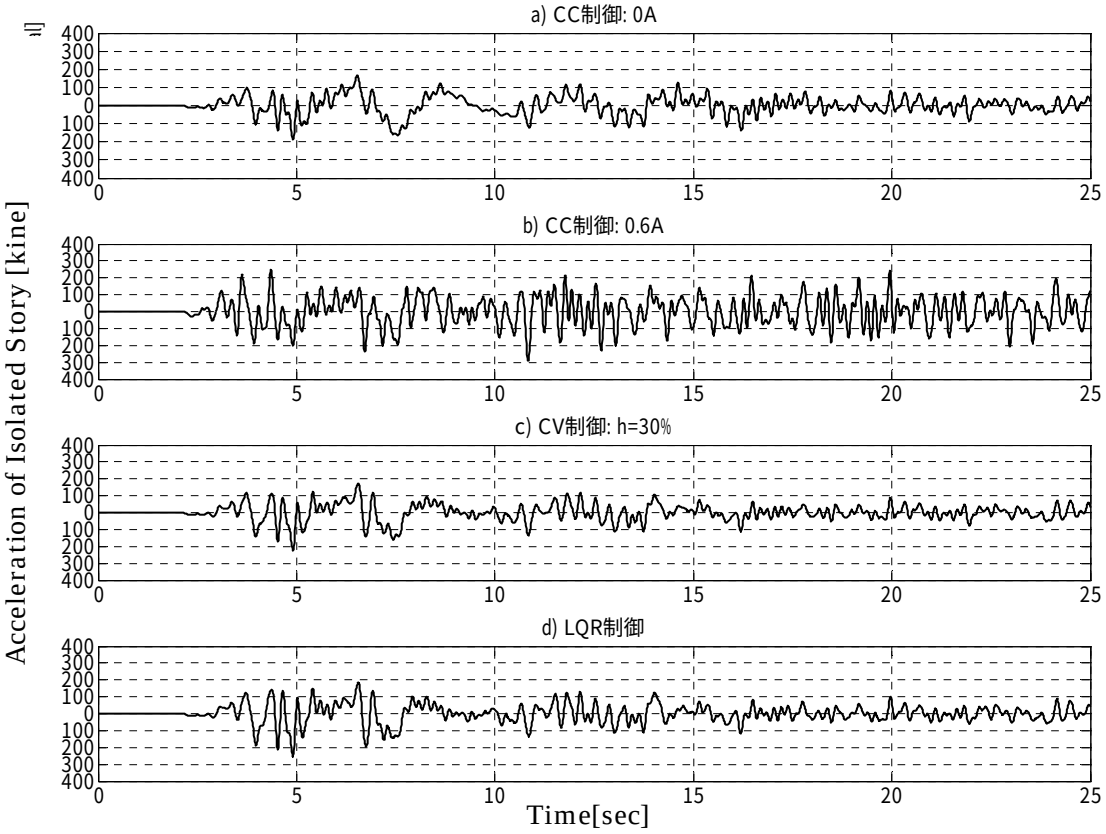


図 6.9　El-Centro NS 50kine 入力時の最上階加速度の時刻歴

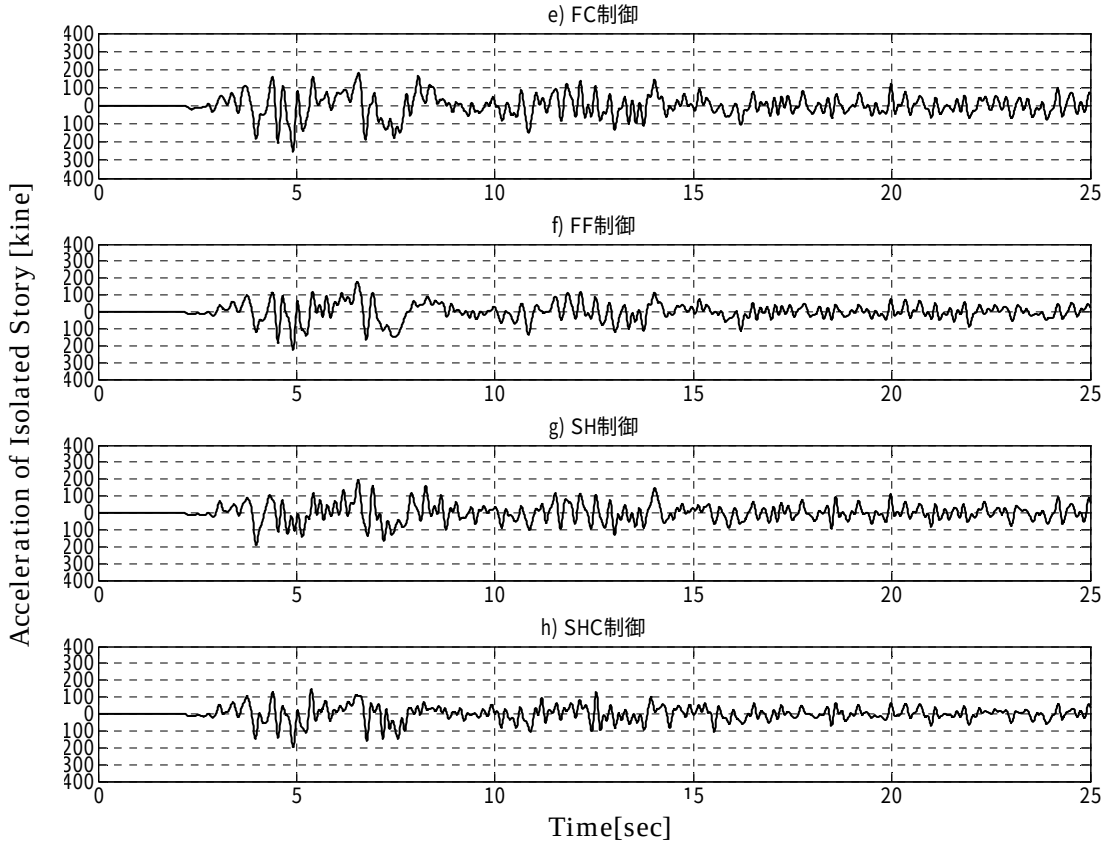
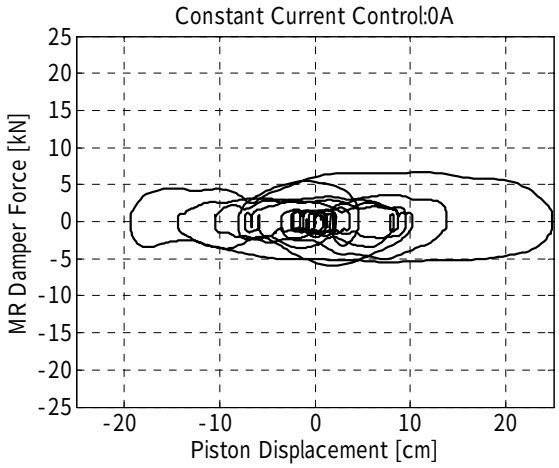
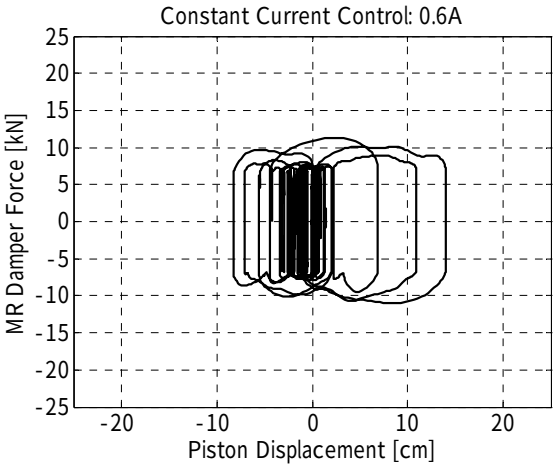


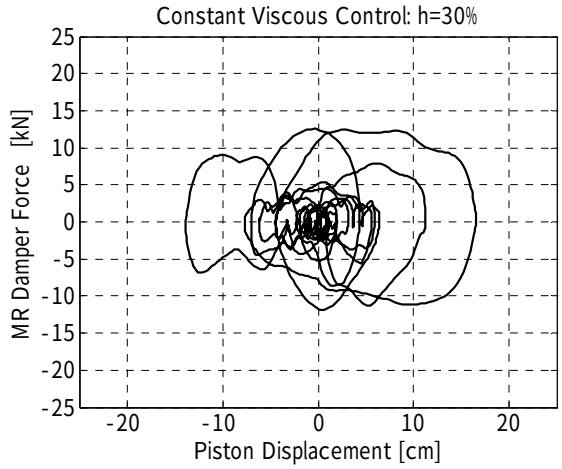
図 6.10　El-Centro NS 50kine 入力時の最上階加速度の時刻歴



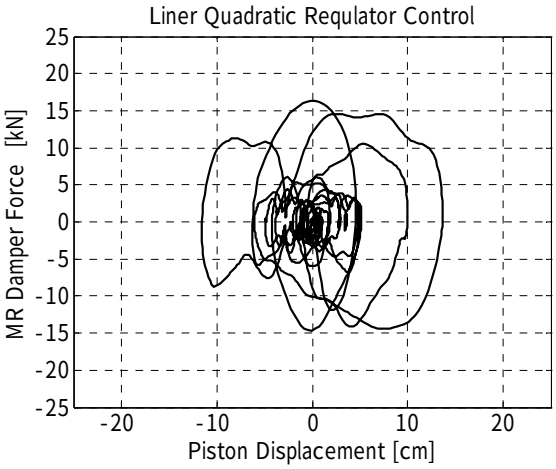
a)CC 制御 0A



b)CC 制御 0.6A

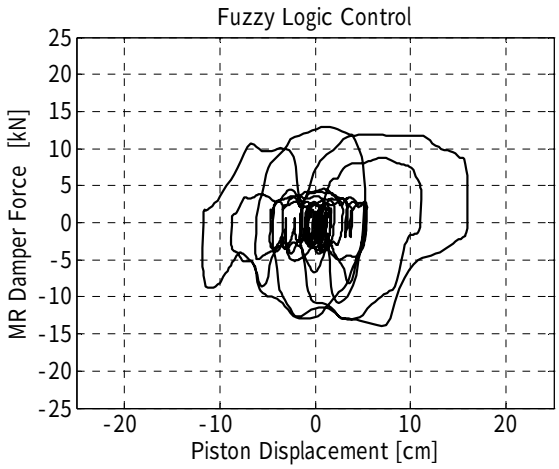


c)CV 制御 h=30%

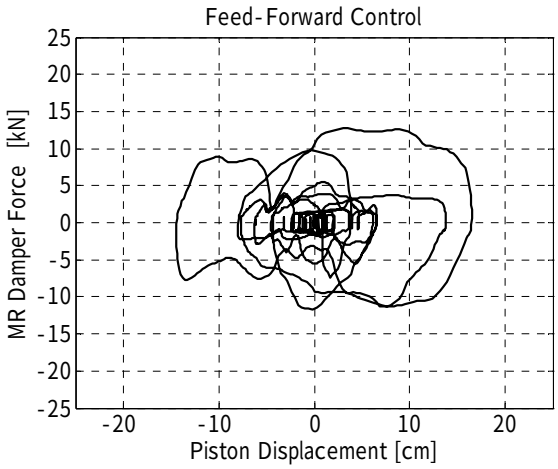


d)LQR 制御

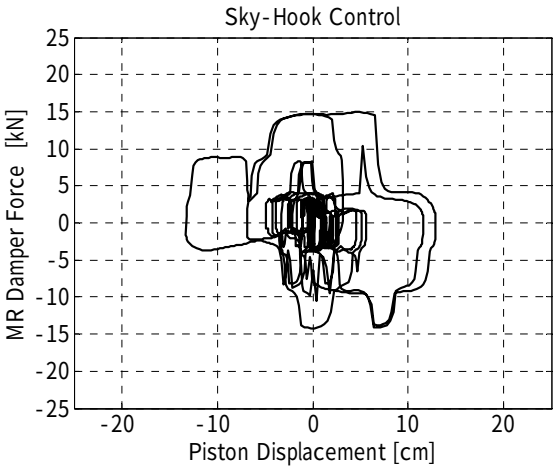
図 6.11　El-Centro NS 50kine 入力時の荷重変位関係



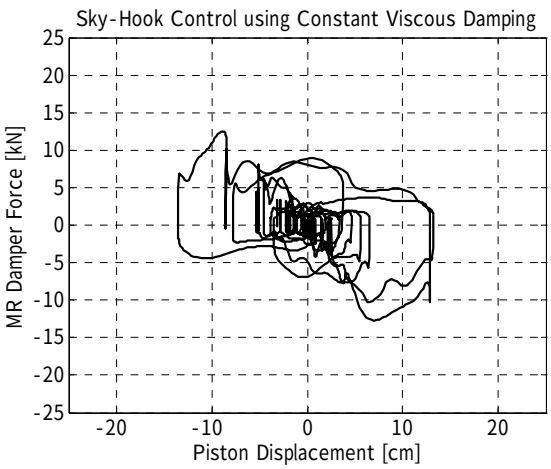
e)FC 制御



f)FF 制御



g)SH 制御



h)SHC 制御

図 6.12　El-Centro NS 50kine 入力時の荷重変位関係

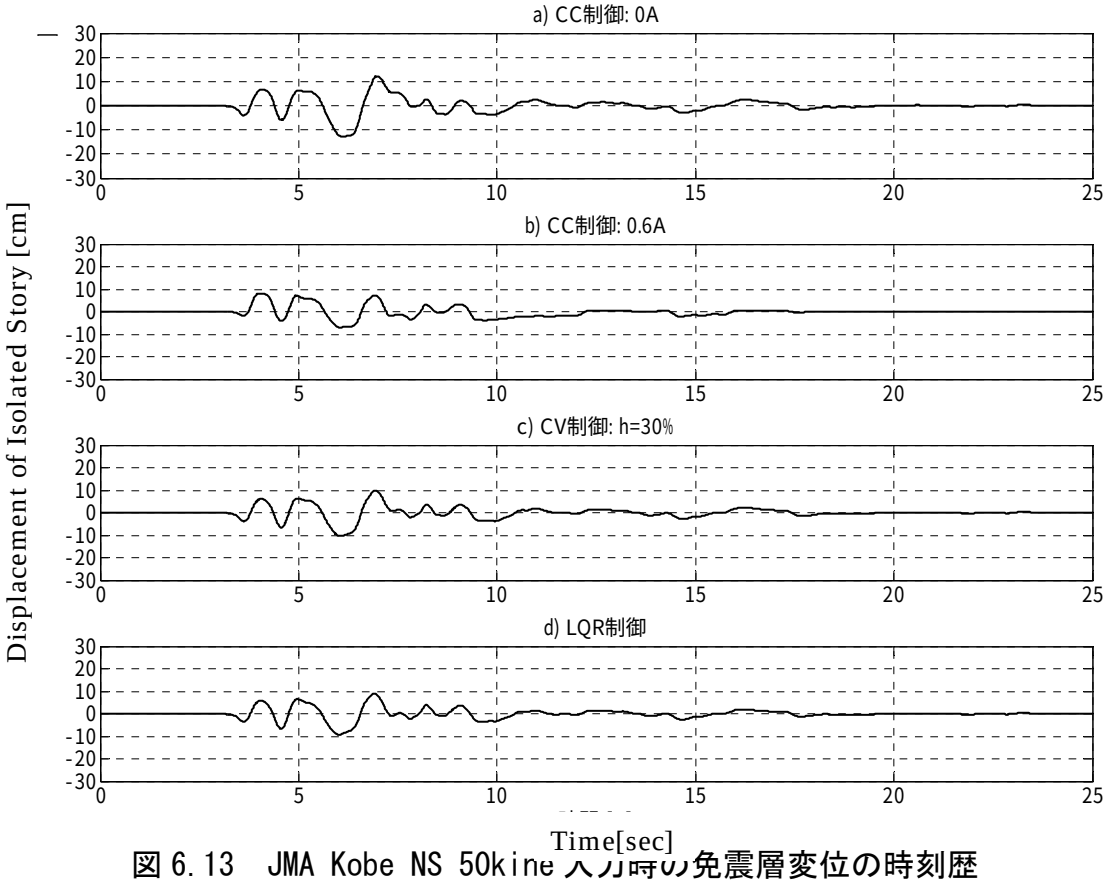


図 6.13　JMA Kobe NS 50kine 入力時の免震層変位の時刻歴

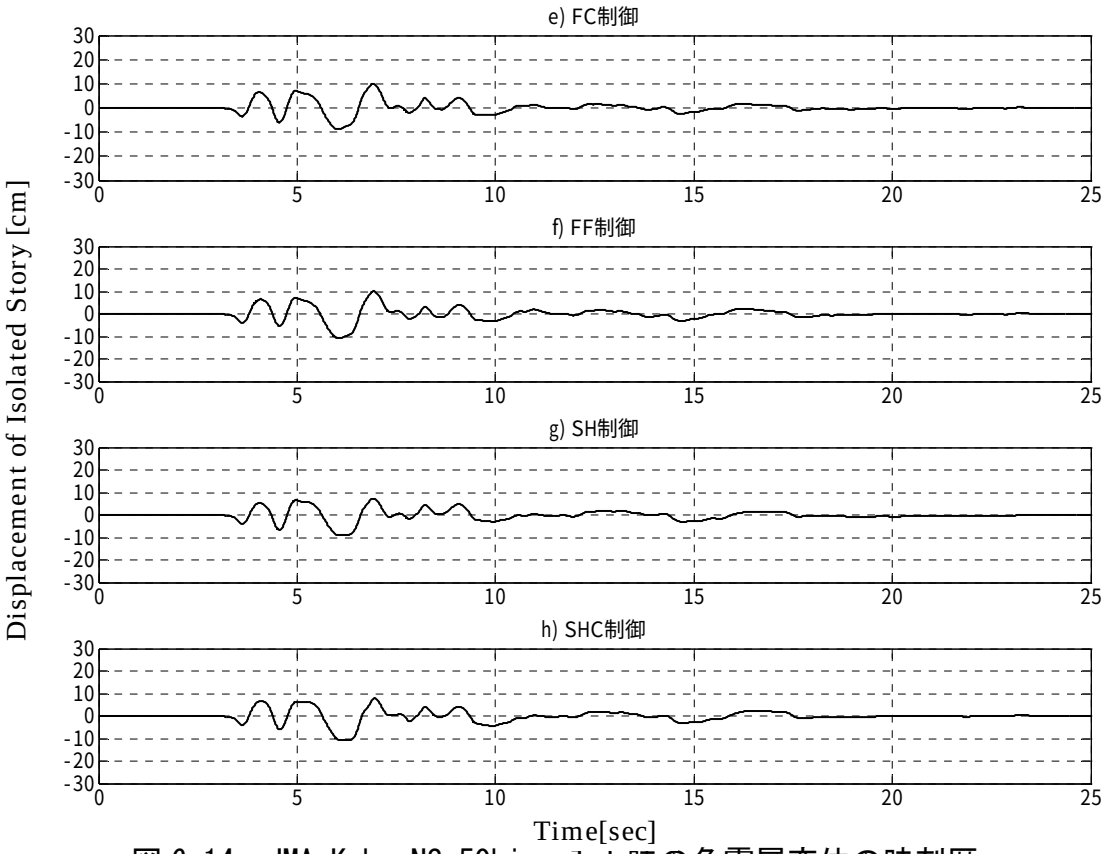


図 6.14　JMA Kobe NS 50kine 入力時の免震層変位の時刻歴

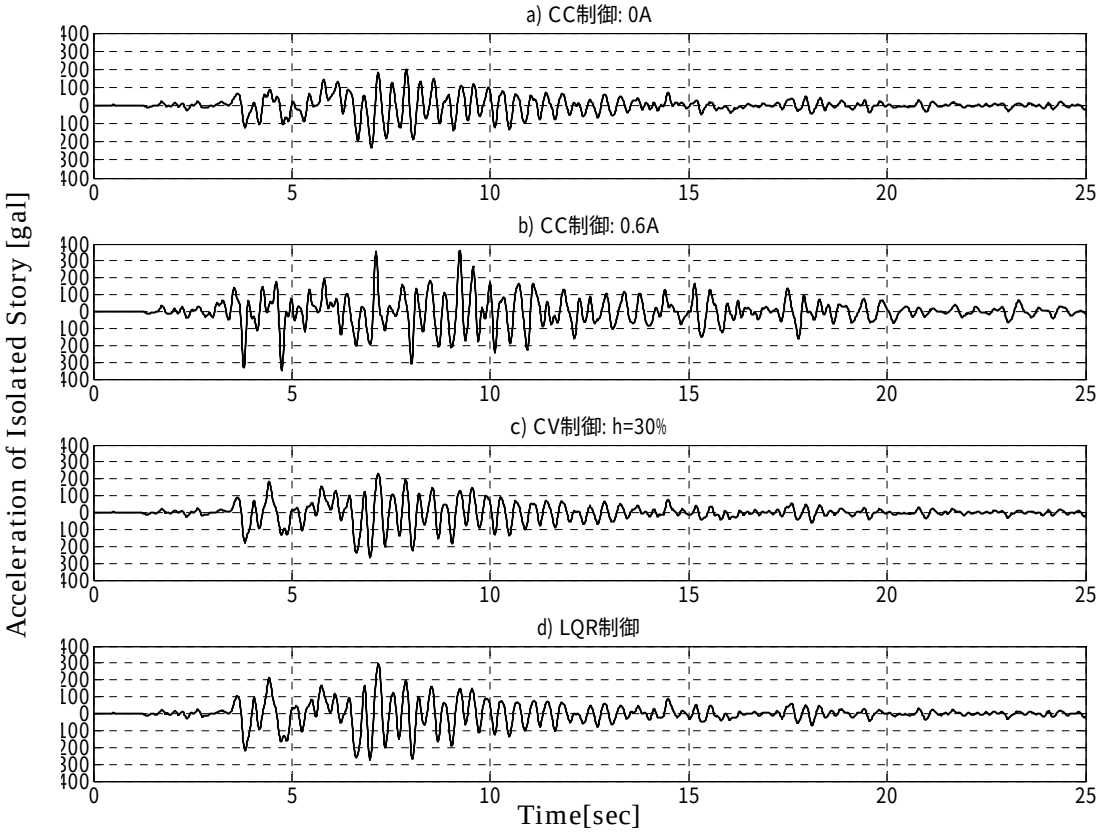


図 6.15　JMA Kobe NS 50kine 入力時の最上階加速度の時刻歴

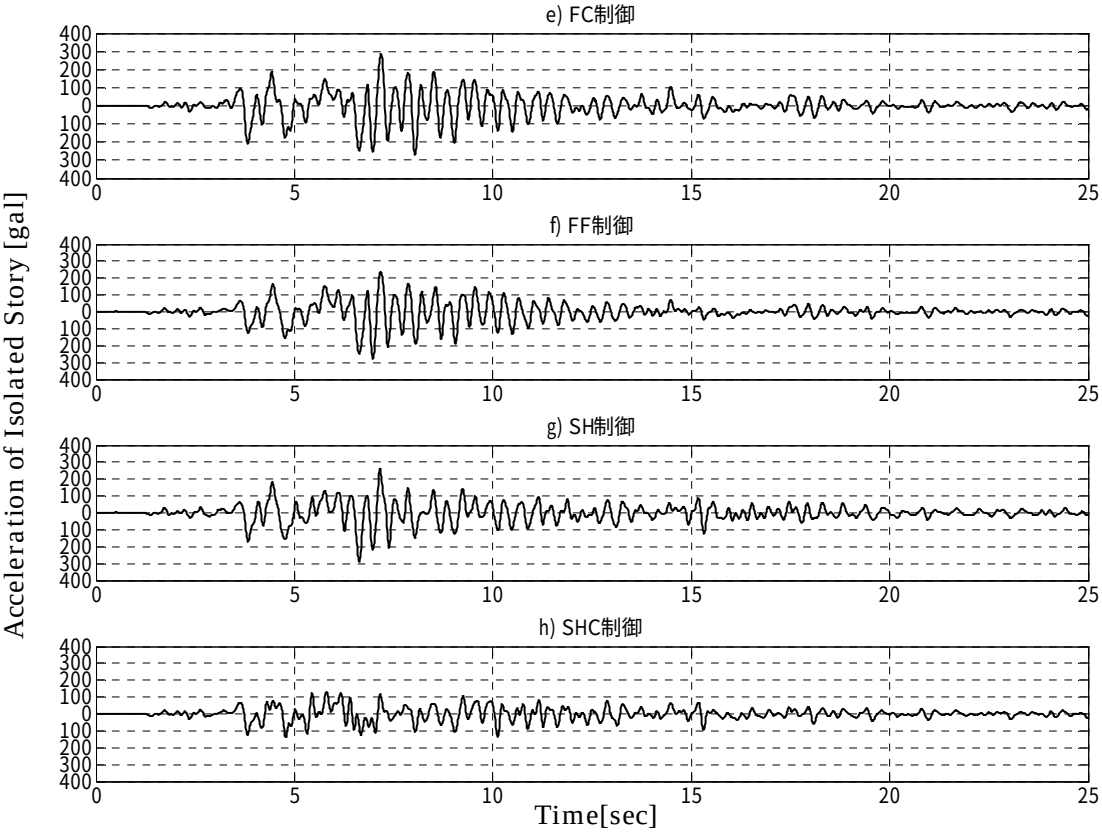
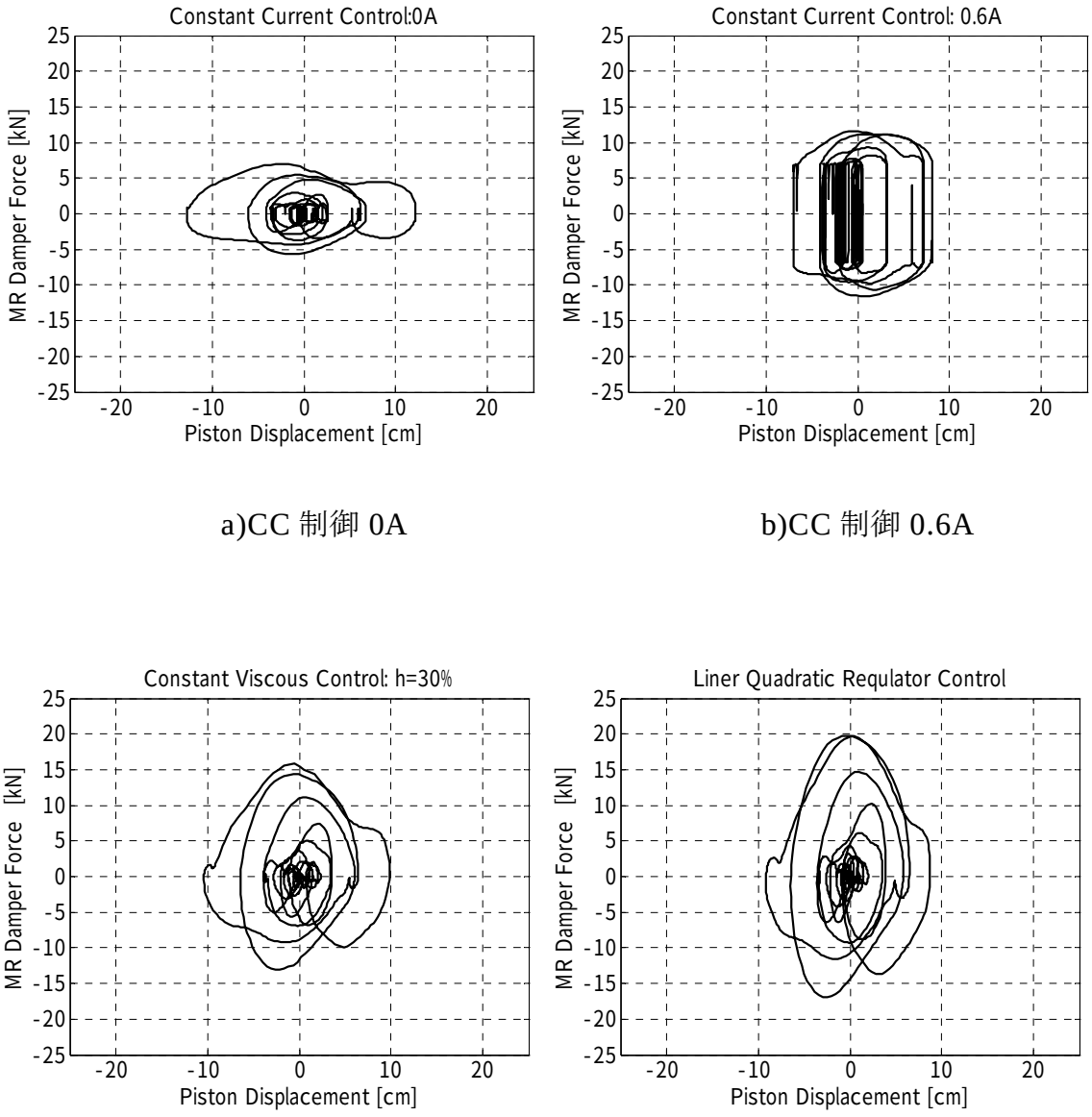


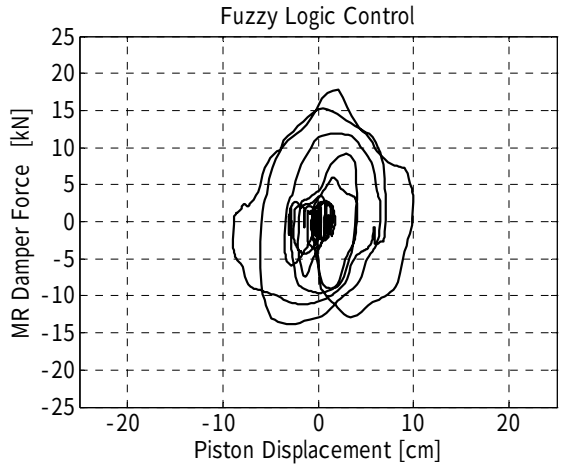
図 6.16　JMA Kobe NS 50kine 入力時の最上階加速度の時刻歴



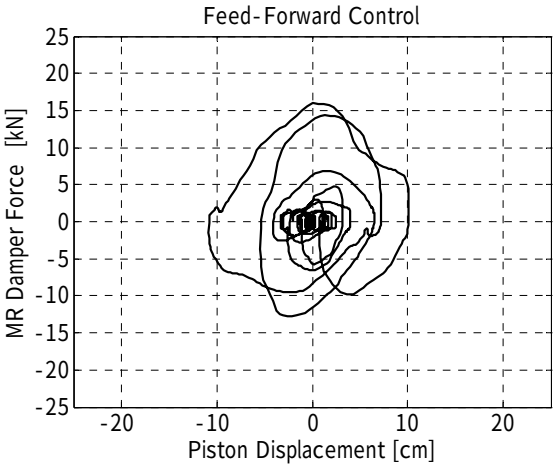
a)CC 制御 0A　　b)CC 制御 0.6A

c)CV 制御 h=30%　　d)LQR 制御

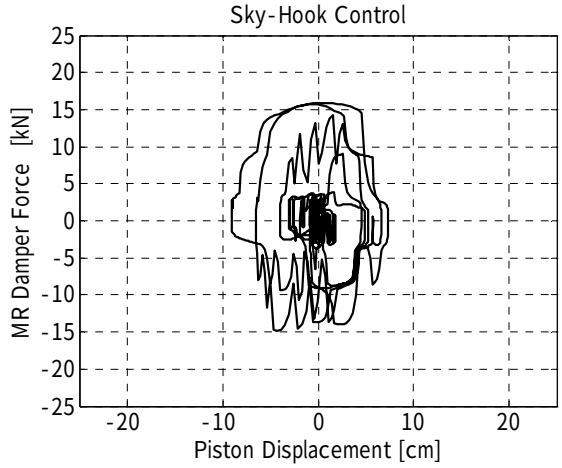
図 6.17 JMA Kobe　NS 50kine 入力時の荷重変位関係



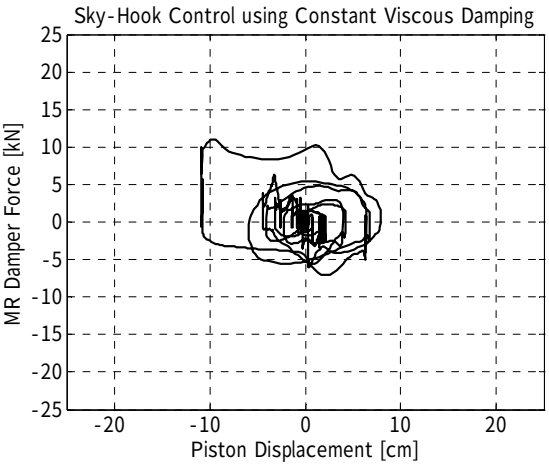
e)FC 制御



f)FF 制御



g)SH 制御



h)SHC 制御

図 6.18　JMA Kobe NS 50kine 入力時の荷重変位関係

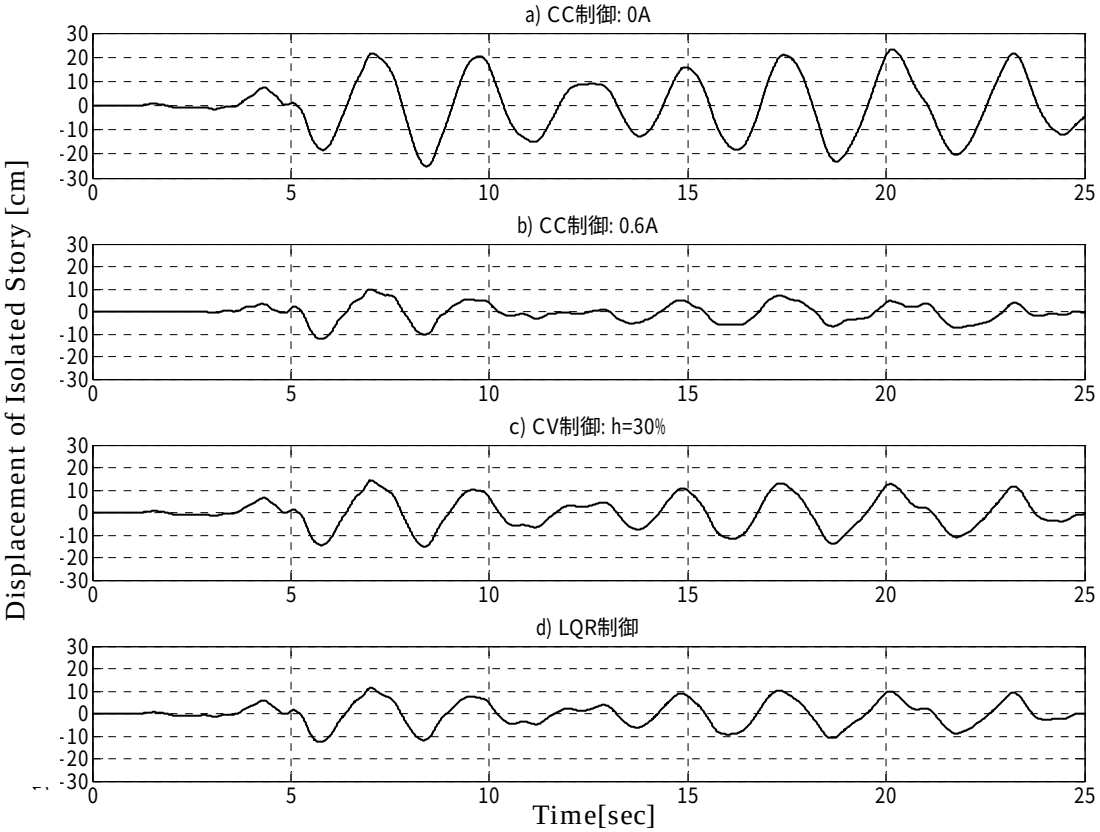


図 6.19　Hachinohe NS 50kine 入力時の免震層変位の時刻歴

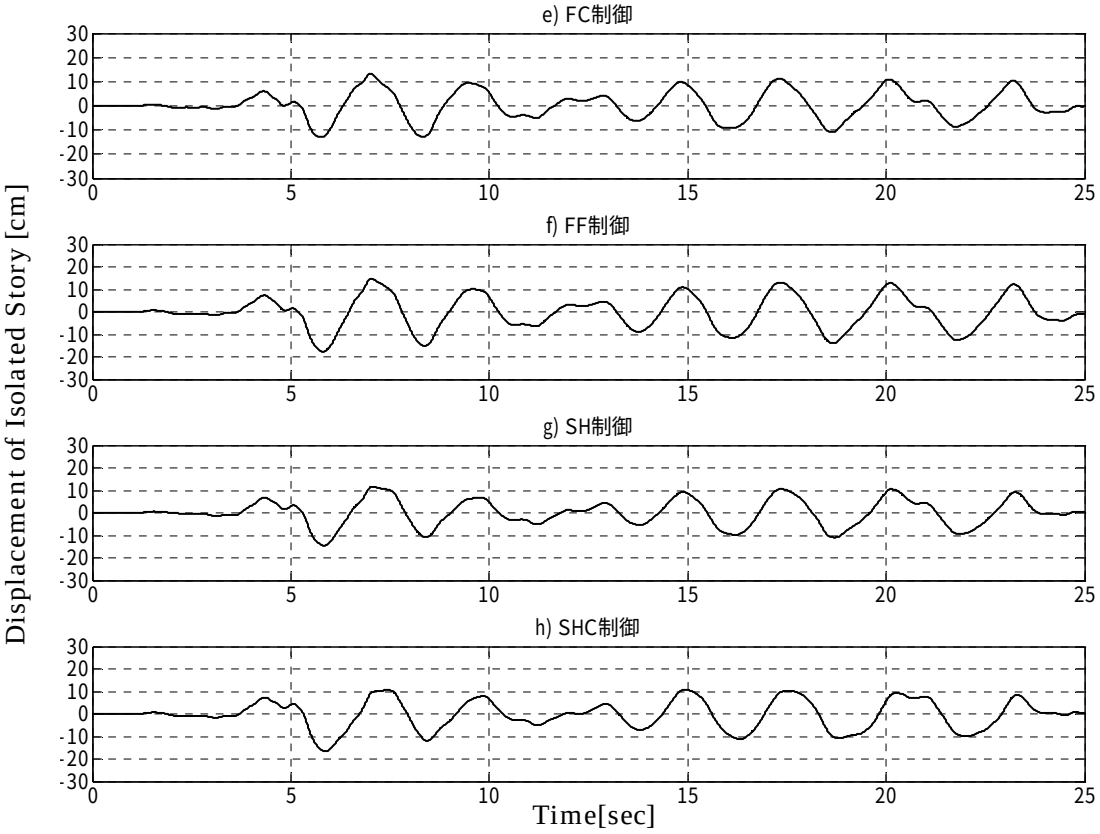


図 6.20　Hachinohe NS 50kine 入力時の免震層変位の時刻歴

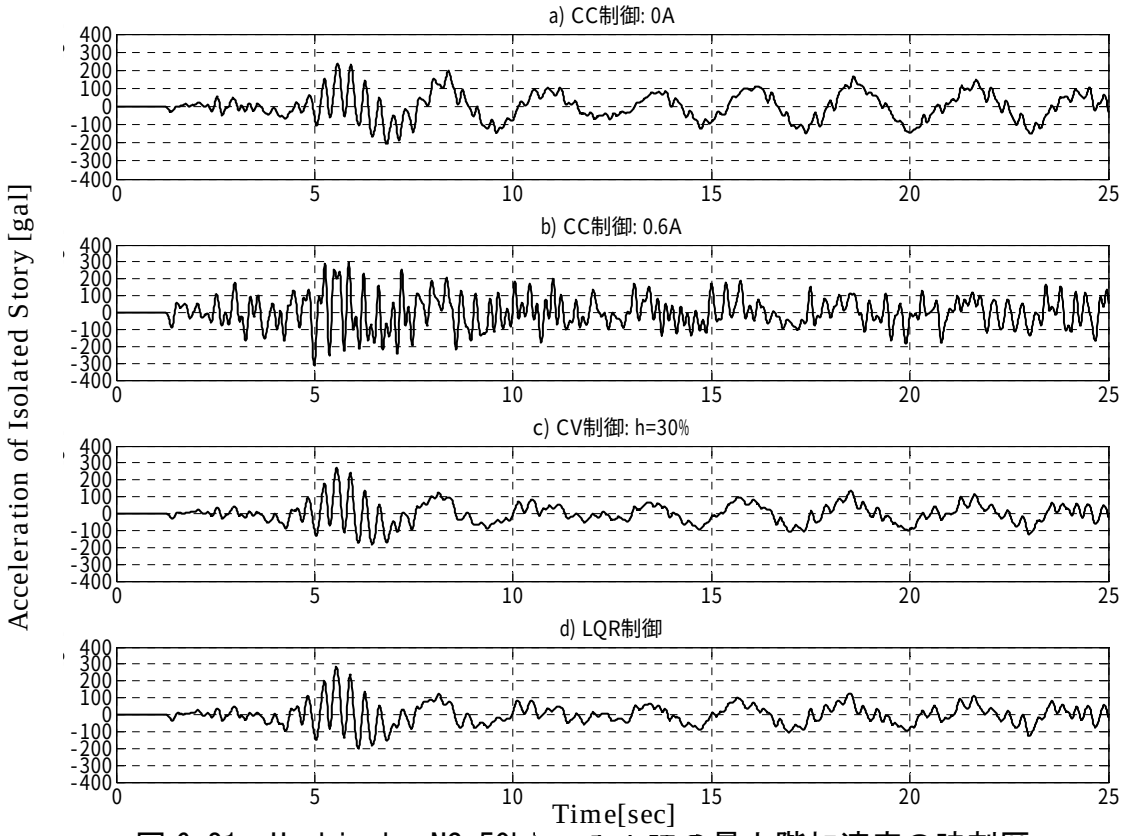


図 6.21　Hachinohe NS 50kine 入力時の最上階加速度の時刻歴

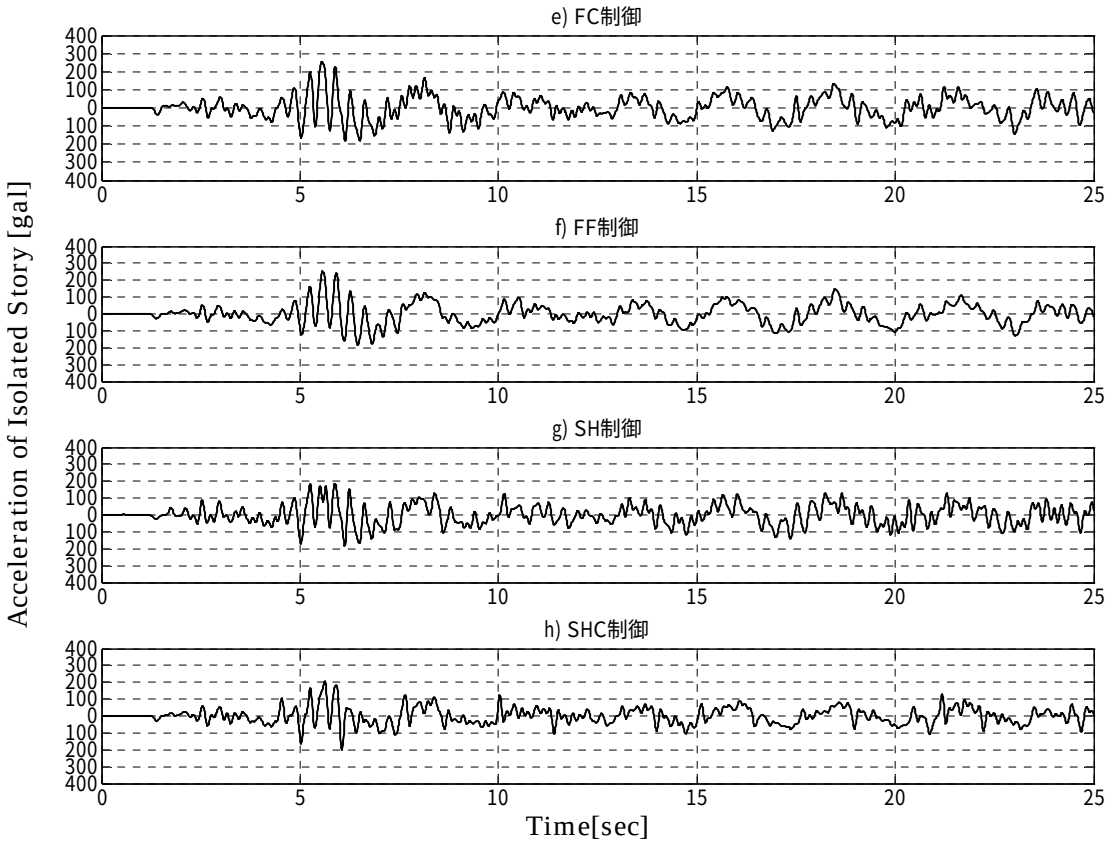
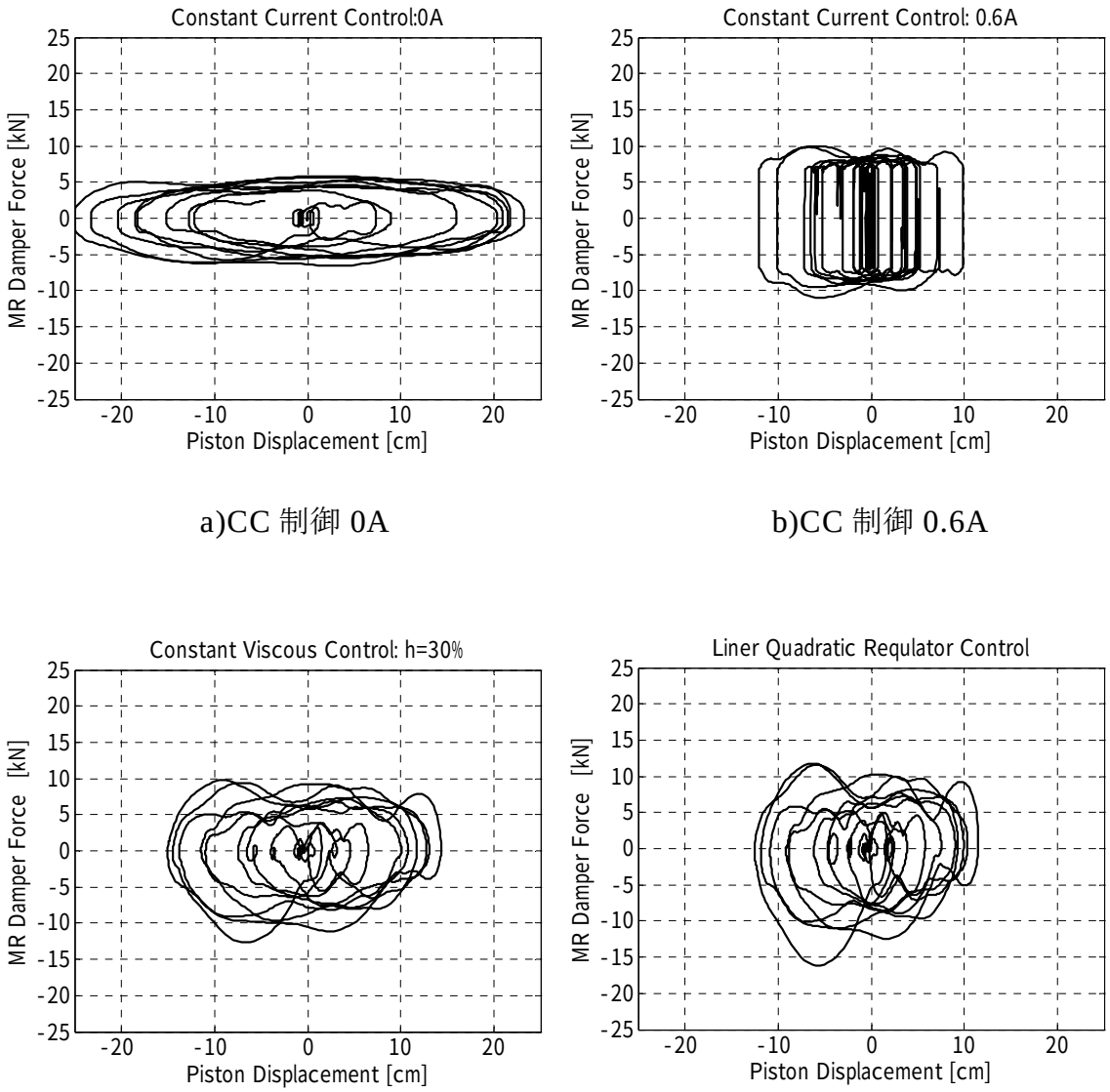


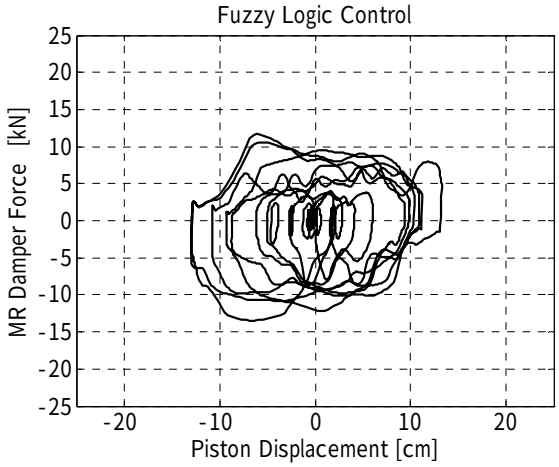
図 6.22　Hachinohe NS 50kine 入力時の最上階加速度の時刻歴



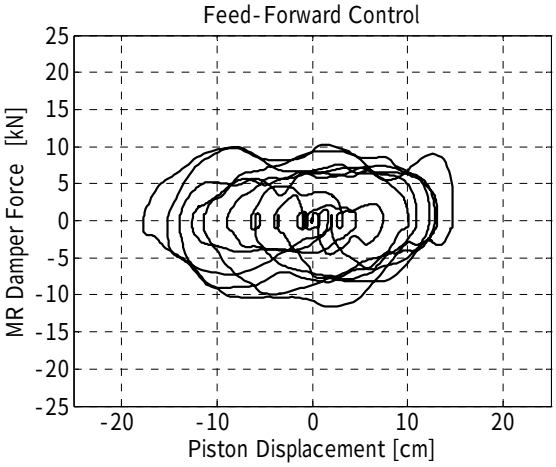
a)CC 制御 0A　　b)CC 制御 0.6A

c)CV 制御 h=30%　　d)LQR 制御

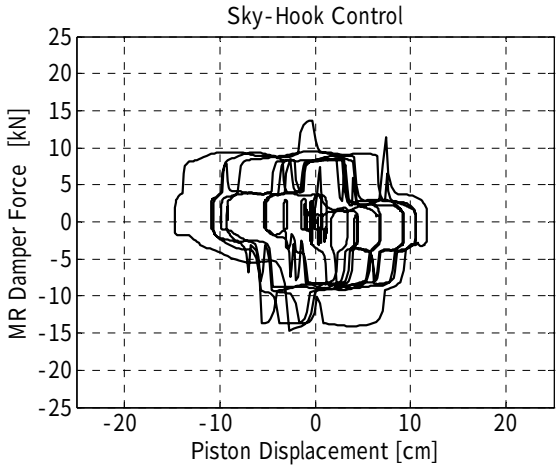
図 6.23　Hachinohe NS 50kine 入力時の荷重変位関係



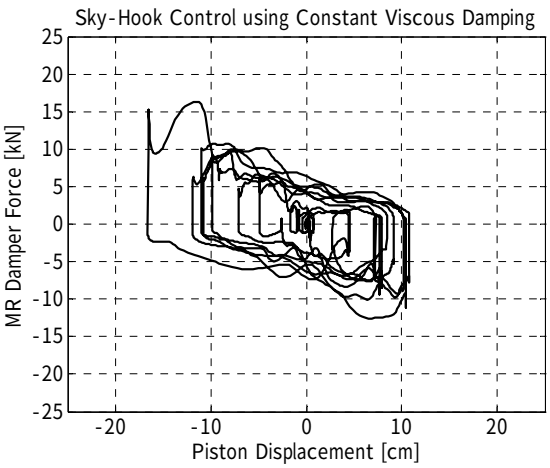
e)FC 制御



f)FF 制御



g)SH 制御



h)SHC 制御

図 6.24　Hachinohe NS 50kine 入力時の荷重変位関係

6.4.2 最大応答のトレードオフ関係の考察

1) 最上階の最大絶対加速度と免震層の最大変位に基づく考察

図 6.25-6.27 に、各制御則アルゴリズムを用いた数値シミュレーションから得られた免震建物における最上階の最大絶対加速度と免震層の最大変位を示す。まずはじめに、いずれの地震波に対しても、CV 制御は CC 制御より変位と加速度を共に抑制することができると確認できた。次に、

a)El-Centro 波において、FF 制御と LQR 制御は CV 制御の低減効果に近く、FC 制御は CV 制御より加速度を抑制することが出来、FF 制御と SHC 制御は他の制御則と比較すると、より制御効果が高いと判断できる。

b)Kobe 波において、パッシブの CC 制御 0.4A と CV 制御 h=30%は、セミアクティブ制御の FC 制御や FF 制御、LQR 制御、SH 制御と比較すると、加速度と変位の低減効果がほぼ同等であること。一方、SHC 制御による応答低減効果は、他の制御則と比べ、同等の変位に抑えられ、加速度が大幅に約 150gal 程度低減された。

c)Hachinohe 波の場合において、FC 制御はパッシブの CV 制御および CC 制御と比較すると、応答制御効果は良好な結果となり、FF 制御と LQR 制御の制御効果が CV 制御と同等である。また、SH 制御と SHC 制御は他の制御則と比べ、加速度が約 50gal に低減され、SH 制御の方が、より変位を低減することができる。

2) 各階最大応答に基づく考察

図 6.28-6.29 には、各階の最大絶対加速度と最大相対変位であり、図中の記号は 5.3 節に記した記号と対応している。 これらの図に基づく考察の要約は下記の通りになる。

1)いずれの地震波に対しても、CC 制御と CV 制御は、層間変位は小さく、印加電流と減衰定数の増加につれ、加速度が増加することを確認した。

2)El-Centro と Kobe 波の場合において、パッシブ制御とセミアクティブ制御の加速度のばらつきは同程度である。

3) Kobe 波の場合において、SHC 制御の加速度は他のパッシブ制御とセミアクティブ制御と比べ、ばらつきが小さい。

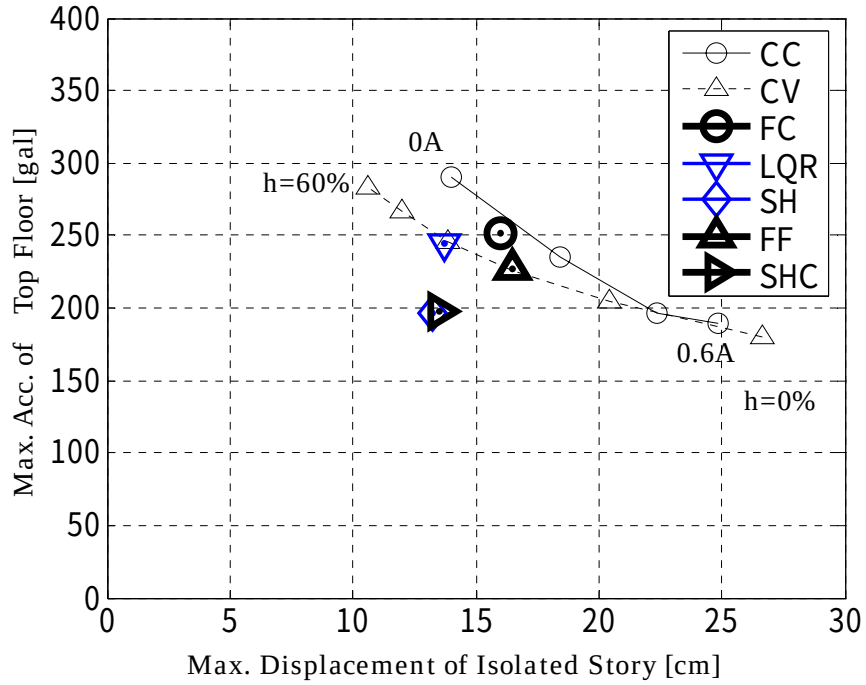


図 6.25　El-Cenro NS 50kine 入力時の最上階加速度と免震層変位の関係

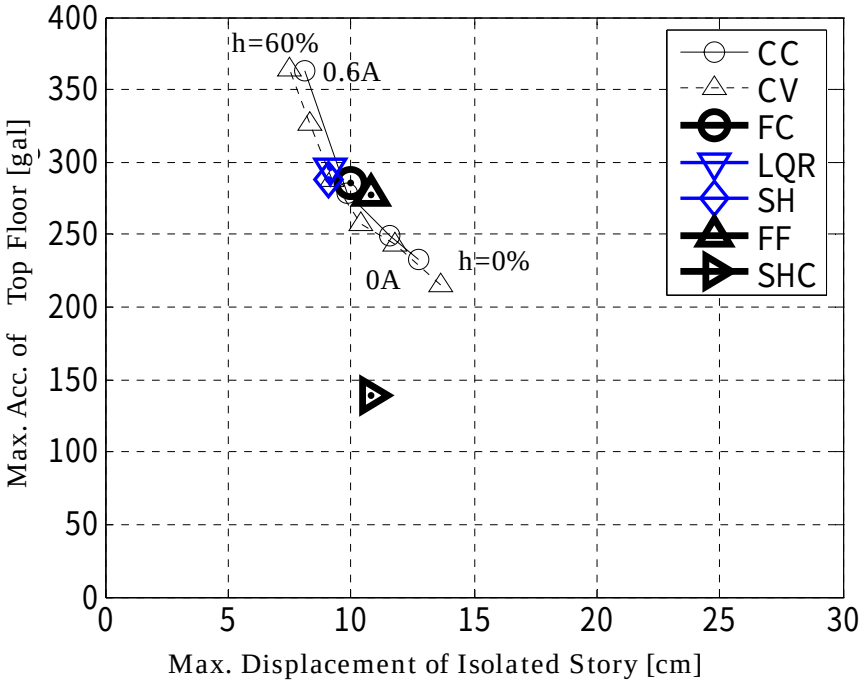


図 6.26　JMA Kobe NS 50kine 入力時の最上階加速度と免震層変位の関係

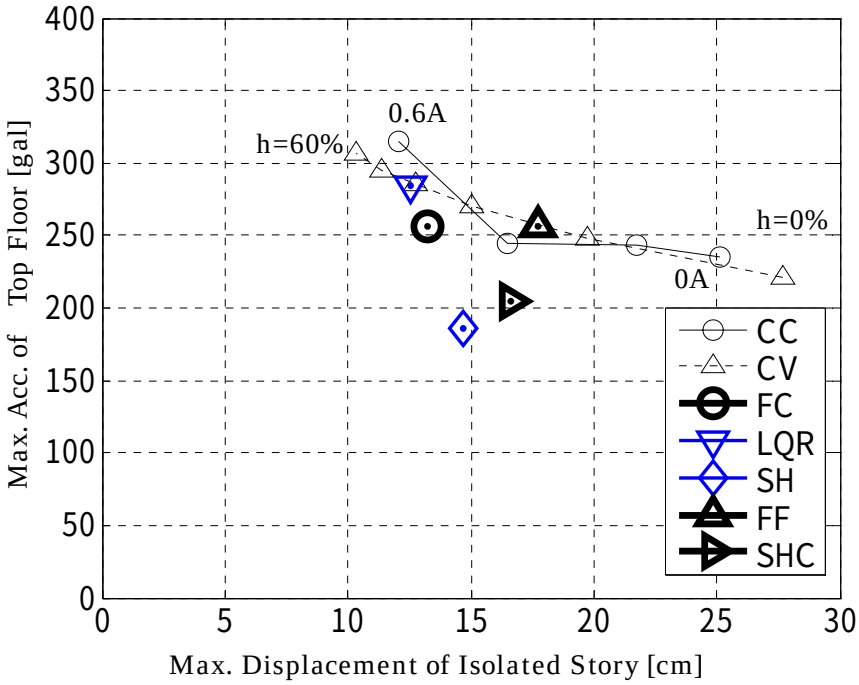
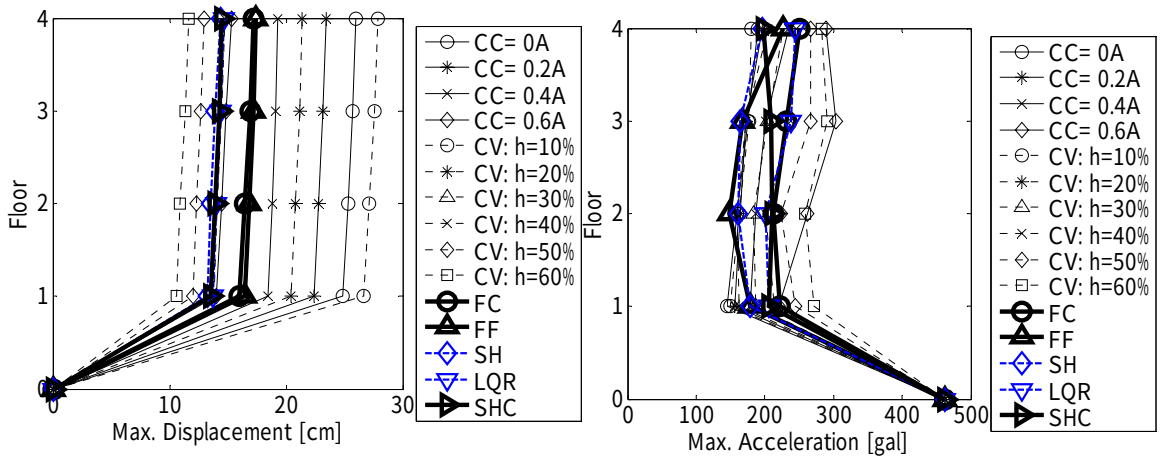
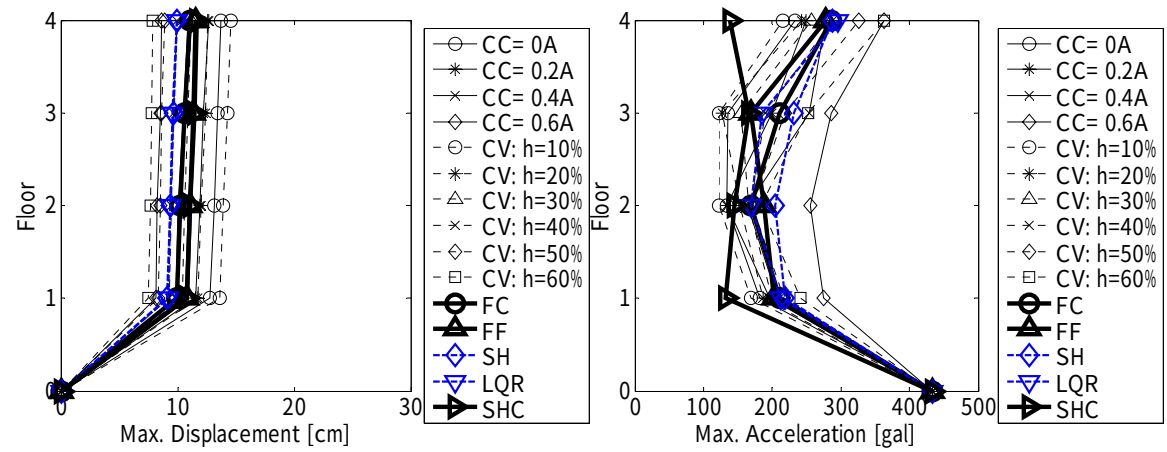


図 6.27　Hachinohe NS 50kine 入力時の最上階加速度と免震層変位の関係



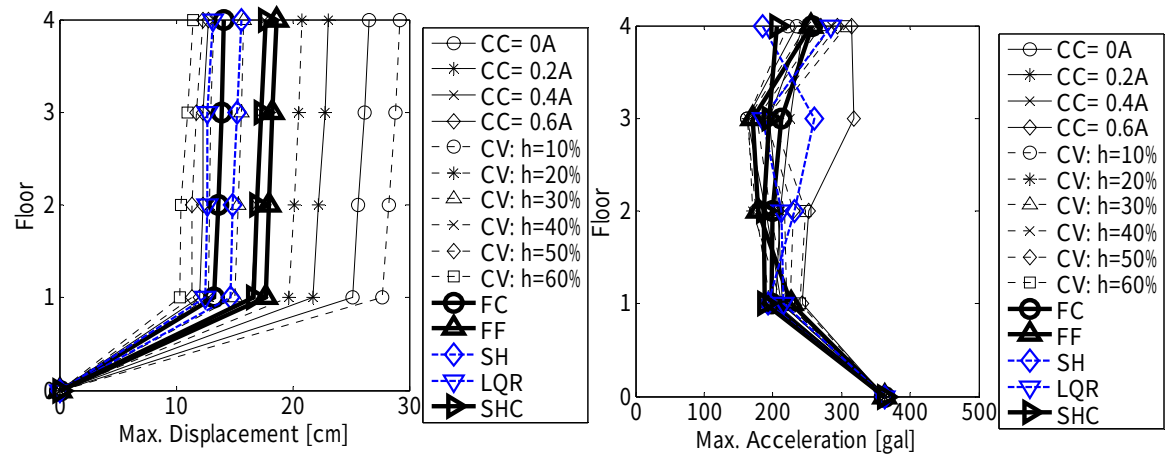
a)最大応答変位　　b)最大応答加速度

図 6.28　El-Centoro NS 50kine 入力時の各階の最大応答



a)最大応答変位　　b)最大応答加速度

図 6.29　JMA Kobe NS 50kine 入力時の各階の最大応答



a)最大応答変位　　b)最大応答加速度

図 6.30 Hanchinohe NS 50kine 入力時の各階の最大応答

6.6　まとめ

本章では、40kN の MR ダンパーによる大型免震鉄骨試験体を制御対象として、数値シミュレーションを行った。まず、はじめに、MR ダンパーと免震建物の概要とそれらの力学特性を記した。次に、地震応答解析および MATLAB/Simulink によるシミュレーション方法と数値計算の概要を記した。下記は解析結果および考察により、得られた主な知見を記す。

1)パッシブの CV 制御では、いずれの地震波に対しても、CC 制御と比較すると、より変位を抑制つつ、加速度を低減することが確認された。この結果は、前章の小型 MR ダンパーを用いた免震鉄骨フレームの制振実験の結果と対応している。

2)セミアクティブ制御では、FF 制御の低減効果は CV 制御の制御効果と近いが、より制御精度の高い予測または応答速度の補正により、より良い制御効果を得られることが出来ると考えられる。また、FC 制御は長周期の Hachinohe において、制御効果を得られるが、他の地震において、CV 制御効果と近い。

3)免震層の絶対速度に基づく SHC 制御では、地震動によらず免震層の応答変位と最上階の最大加速度を共に、低減することが出来る事が確認された。この結果は、第 2 章の小型試験体でも反映できると考えられる。特に SHC 制御では、負剛性を有する荷重変形関係、および他のセミアクティブ制御と比較すると、より小さい制御力により、高い制御効果を得ることが特徴である。

第 6 章の参考文献

1)楠本玄英 : MR ダンパーによる免震建物のハイブリッドセミアクティブ制御に関する研究、早稲田大学修士論文、2003

2)サイバネットシステム、Web ページ : http://www.cybernet.co.jp/matlab/、2006

3)大川善邦、MATLAB による組み込みプログラミング入門～Simulink と Real-Time Workshop を使った～、CQ 出版、2005

4)井上波彦、渡壁守正、西村秀和、龍神弘明、仲宗根淳、中村佳也 : 2 自由度系免震建物に適用した MR ダンパーによるセミアクティブ制御(GS 制御)性能、日本建築学会構造系論文集、No.609、pp.57-64、2006

5)Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A.: Vibration Control using Semi- active Force Generators, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, pp.619-626, 1974

第 7 章

結論

小型免震用 MR ダンパーを開発し、免震フレームモデルに設置して振動台実験を行い、パッシブ制御とセミアクティブ制御の比較検討を行った。実験結果およびシミュレーション解析により得られた知見を要約すると以下の通りとなる。

第 2 章小型 MR ダンパーの開発では、小型免震用両ロッド式の MR ダンパーを開発について記した。単体実験の結果より、ビンガムモデルを用いたダンパーの力学性能を模擬した。同定・構築したモデルを用いて応答解析を行うには、十分に妥当性があるといえる。また、急激な電流印加に対してダンパー抵抗力は若干の時間遅れを生じることが確認された。

第 3 章小型 3 層免震フレームの設計とその動特性では、V 溝レール上を直径 50.5mm の鋼球が転がる単純な機構を有する小型免震フレームを設計・開発について記した。次に、免震建物モデルに対して、FDD 法を用いて固有振動数と減衰定数の評価を行った。小型免震フレームと小型 MR ダンパーの組み合わせによる振動台実験によっても、研究の目標である、多様なパッシブ制御とセミアクティブ制御の比較検討を達成する事ができた。

第 4 章セミアクティブ制御アルゴリズムでは、ファジィ制御則と速度応答予測制御則を提案し、それぞれの減衰力の求め方を示した。また、地震応答の低減効果に対してパッシブ制御とほかのセミアクティブ制御との比較検討を行うため、定電流、速度比例減衰制御、スカイフック制御、LQR 制御のパラメータを示した。

第 5 章小型 3 層免震フレームの振動台実験では、小型 MR ダンパーを用いた免震フレームモデルの振動台実験によりパッシブ制御とセミアクティブ制御の比較検討を行った。パッシブ制御においても十分に応答は低減できるものの、最適な制御のための条件設定が難しく、地震動特性の影響を強く受ける。セミアクティブ制御において提案した FC 制御及び FF 制御では、比較的良好かつ安定した制御効果を発揮すると考えられる。また、セミアクティブ制御のための最適なパラメータを決めるための事前解析結果と、実験結果との対応は概ね良好であり、ダンパーのモデル化や、1 自由度系による近似制御に大きな問題の無いことを確認できた。

第 6 章大型 3 層免震フレームのシミュレーション解析では、大型 MR ダンパーを用いた免震フレームの数値シミュレーションにより、SH 制御や LQR 制御、FC 制御、FF 制御によるセミアクティブ制御が常にパッシブ制御を上回る結果とはならなかったものの、絶対速

度に基づくスカイフックダンパー制御(SHC 制御)では、地震波によらず、より応答変位と応答加速度を抑制することが確認できた。

今後の展望は、MR ダンパーの試用として 1.3 節に記したように実建物に設置されており、地震応答観測により得られた MR ダンパーの挙動を検証し、流体沈殿と反応時間遅れに対するダンパー抵抗力の影響の検討が重要だと考えられる。

謝辞

本研究は、筆者が早稲田大学大学院理工学研究科建築学専攻の博士課程在籍中（2004 年 4 月～2007 年 3 月）に行った研究の成果をまとめたものです。博士過程の 3 年間、なんとかやってこられたのもひとえに皆様方のご協力の賜物と感謝しております。特に曽田五月也教授には時に厳しく、時に優しく、いつもあたたかくご指導ご鞭撻を賜り、心からの感謝を申しあげます。

本論文の審査の際、早稲田大学理工学部建築学科の西谷章教授、前田寿朗教授には多くのご指摘、アイデアをいただき、深く感謝いたしております。

本研究は、高減衰構造物に関する研究（研究代表者：曽田五月也、2000～2005 年）及び、粘性系ダンパーによる既存建築物の制振補強に関する研究（研究代表者：曽田五月也、2006 年～継続中)での研究プロジェクトに参加された企業各社、月次研究会及び年次シンポジウムより多数の貴重なご意見を参考に致しました。ここに改めて深く感謝申し上げます。

苦楽を共に過ごした研究室の仲間達、萩原伸彦氏（現・東亜建設工業）より勇気や励ましがあったからこそ信念を曲げず論文を作ることが出来ました。そして、荻野和臣君（竹中工務店)、3年間という長き時間を二人で協力し合い、苦悩を乗り越えてきました。君と一緒だったからこそ、目標達成を遂げる事が出来たと思います。チューターとして指導して頂いた内藤雄介氏（現・大和総研)、博士課程3年在籍中である松永裕樹君、博士課程1年在籍中の宮津裕次君、ご協力の皆様に深くお礼申し上げます。また、研修で国際協力事業団（JICA）から研究室に来る中国のMinghe Lin氏、アルジェリアのMohamed Ouksili氏、3ケ月間を共に過ごし、研究以外（富士山までも登った）にも心の通い合う本当の国際交流を体験することができました。青春時代の数々の素晴らしい思い出を支えに、新しい生活を進めてまいります。

小型 MR ダンパーを製作したシズメテックの鎮目武治様、平素より様々な場面でお世話になりましたアジア文化会館（ABK)、東京国際交流会館、及び東京都文京区区役所日本語教室でボランティアの皆様に深く感謝いたします。

2002 年、台湾政府より奨学金の給付を受け、無事、博士課程を修了することができ、台湾教育部、及び台湾駐日文化代表処に深くお礼申しあげます。また、国家公務員として誠に勝手な自己都合休職でありましたが、心より承諾、応援してくださいました国立台湾芸術大学学長をはじめ、総務部の皆様方に感謝に堪えない思いでいっぱいです。

2003 年、熱心な修士研究（1995-1997 年）のご指導、ご鞭撻を頂いた台湾国立中央大学土木研究科唐治平教授、セミアクティブ制御研究のご意見を頂いた国立台湾大学土木研究科羅俊雄教授に深く感謝申し上げます。

私をずっと支えて頂いた亡くなった父、母、及び兄2人、姉3人、弟のご夫婦に格別な感謝を申し上げます。また、何の不平も言わず、支えてくれた妻に捧げます。

最後になりましたが、皆様方のますますのご発展とご健康を心よりお祈りいたしまして、簡単ではありますが、御礼のご挨拶といたします。